



การปรับปรุงสมบัติด้านธรณีเทคนิคของดินเหนียวอ่อนสงขลาด้วยเถ้าแกลบและ
เถ้าไม้ยางพารา

**Improvement of Geotechnical Properties of Songkhla Soft Clay with Rice Husk Ash and
Para Rubber Wood Ash**

อรุณ สุวรรณสุนทร

Arun Suwansuntorn

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงสมบัติด้านธรณีเทคนิคของดินเหนียวอ่อนสงขลาด้วยเถ้าแกลบ
 และเถ้าไม้ยางพารา

ผู้เขียน นายอรุณ สุวรรณสุนทร

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

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

..... ประธานกรรมการ
 (ศาสตราจารย์ ดร.พิชัย ธานีรณานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

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

.....
 (ดร.พิพัฒน์ ทองนิม)

.....กรรมการ
 (ดร.พิพัฒน์ ทองนิม)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เฉลิมยานนท์)

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพิฤกษ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
 เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม
 โยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมบัติด้านธรณีเทคนิคของดินเหนียวอ่อนสงขลาด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา
ผู้เขียน	นายอรุณ สุวรรณสุนทร
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)
ปีการศึกษา	2552

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการทดลองการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนสงขลาด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา โดยแทนที่ดินบางส่วนด้วยเถ้าอย่างละชนิดและทั้งสองชนิดจากร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 50 ที่ช่วงละร้อยละ 5 เตรียมตัวอย่างรูปทรงกระบอก (38×84 มม) ที่ความชื้นเหมาะสมและบ่มเป็น 5 ช่วงเวลา ที่อายุ 1 7 14 28 และ 56 วัน ภายใต้บรรยากาศห้องที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอากาศ หลังครบกำหนดการบ่มนำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกล อันประกอบด้วย พิกัดแอดเทอร์เบอร์ก การกระจายขนาดของอนุภาค ความถ่วงจำเพาะ กำลังอัดแกนเดียว การบดอัดแบบมาตรฐาน ทดสอบอัตราส่วนแรงแบกทานแบบแคลิฟอร์เนียแบบไม่แช่น้ำและการอัดตัวคายน้ำ การทดสอบทั้งอัตราส่วนแรงแบกทานแบบแคลิฟอร์เนียและการอัดตัวคายน้ำเลือกจากอัตราส่วนผสมที่ทำให้กำลังอัดแกนเดียวสูงสุด นอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและ โครงสร้างจุลภาคของดินตัวอย่างที่อัตราส่วนผสมดังกล่าวด้วยวิธีการวางแสงรังสีเอกซ์ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลการวิจัยพบว่าดินเหนียวอ่อนสงขลาที่ปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราได้ให้น้ำหนักแห้งสูงสุดและสมบัติทางวิศวกรรมสำหรับดินผสมเถ้าทั้งสองดีขึ้นตามปริมาณเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราและอายุบ่ม ซึ่งพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด คือ เถ้าแกลบร้อยละ 20 และเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 30 โดยให้กำลังอัดแกนเดียวสูงสุด 5.39 กก./ซม.² และค่าอัตราส่วนรับแรงแบกทานแบบแคลิฟอร์เนียเท่ากับร้อยละ 21 ที่อายุบ่ม 28 วัน ส่วนการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนสงขลาที่ปรับปรุงได้ค่าดัชนีการอัดตัวและค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านลดลง ในขณะที่อัตราส่วนโพรงมีค่าเพิ่มขึ้นจากดินบดอัดอันเป็นผลจากรูเล็กที่กระจายอยู่ทั่วไปในเถ้าทั้งสอง

ในขณะที่ผลการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและไฮเดรชันในดินสงขลาที่ปรับปรุงก่อนให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตอย่างชัดเจน มีค่าเพิ่มขึ้นคือ ประมวลร้อยละ 8 11 15 และ 16 ตามอายุการบ่มที่ 7 14 28 และ 56 วัน ตามลำดับ ซึ่งการตรวจโครงสร้างจุลภาคพบว่า

เนื้อดินมีการประสานติดกันแน่นขึ้น ได้จัดทำสหสัมพันธ์แบบถดถอยเชิงซ้อนของสมบัติทางธรณีเทคนิคขึ้นกับสมบัติตัวบ่งชี้

คำหลัก: ดินเหนียวอ่อนสงขลา เถ้าแกลบ เถ้าไม้ยางพารา การปรับปรุงดิน ปฏิกริยาปอซโซลาน

Thesis Title	Improvement of Geotechnical Properties of Songkhla Soft Clay with Rice Husk Ash and Para Rubber Wood Ash
Author	Mr. Arun Suwansuntorn
Major Program	Civil Engineering (Geotechnical Engineering)
Academic Year	2009

ABSTRACT

This thesis a laboratory study was undertaken to improve Songkhla soft clay (SC) with rice husk ash (RHA) and Para rubber wood ash (RWA). The SC was partially replaced each ash and combined ashes in proportion varies from 5 to 50wt.% at 5% intervals. Cylindrical specimens (38×84 mm) were prepared at optimum moisture content and were cured for five periods at age of 1, 7, 14, 28 and 56 days in a moist room having a constant temperature and controlled humidity. After curing specimens were tested for physical and mechanical properties including of Atterberg limits, particle size distribution, specific gravity, standard Proctor compaction, unconfined compression (UCS), unsoaked California bearing ratio (CBR) and consolidation tests. Both CBR and consolidation tests were selected the maximum UCS of treated samples. In addition, X-ray fluorescence (XRF) and X-ray diffraction (XRD), together with a scanning electron microscope (SEM) were analysed in certain samples.

The study revealed that the values of the maximum dry unit weight and engineering properties for the RHA+RWA-stabilized specimen increased with RHA and RWA contents and curing times. From the results obtained 20%RHA and 30%RWA replacement of SC as an optimum amount. The maximum 28-day UCS was 5.39 ksc and CBR value at 28-day was about 21%. Consolidation result of SC obtained compression index value and permeability coefficient value was decreased. On the other hand, void ratio value products due to distributed capillary in texture of ashes increased.

While reaction products due to pozzolanic and hydration reactions in treated SC are clearly observed calcium silicate hydrate increasing 8%, 11%, 15%, and 16% on curing of 7 14 28 and 56 days, respectively. They are exhibited denser and void in treated sample based on

using SEM. Correlations with multiple regressions for geotechnical properties as functions of index properties have been established.

Key words: Songkhla soft clay, Rice husk ash, Para rubber wood ash, soil improvement, Pozzolanic reaction

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ดนุพล ตันนโยภาส อาจารย์ที่ปรึกษาหลักและอาจารย์ ดร. พิพัฒน์ ทองฉิม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ในการกำหนดหัวข้อการศึกษาวิจัย แนะนำแนวทาง วิธีการและขั้นตอนการศึกษาวิจัย ตลอดจนติดตามความก้าวหน้าอย่างใกล้ชิดและมีเวลาให้ผู้เขียนปรึกษาปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับการดำเนินการศึกษาตลอดเวลาระหว่างการดำเนินการวิจัย

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ศาสตราจารย์ ดร.พิชัย ธานีรณานนท์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เถลิงยานนท์และรองศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพิฤกษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาในการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้กรุณาสั่งสอน อบรม ให้ความรู้ ให้คำปรึกษาและแนะนำเรื่องต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์เป็นไปตามเป้าหมาย จนบรรลุวัตถุประสงค์และขอบเขตในการศึกษา

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่สำนักงานภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่านและเจ้าหน้าที่หน้าบัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการเขียนและตรวจสอบเอกสารตั้งเริ่มจนจบการศึกษา

ขอขอบใจ ค.ญ.วริษาและค.ช.กษมา สุวรรณสุนทร บุตรและคุณประไพ สุวรรณสุนทร ภรรยาของผู้เขียน ที่ให้ความรักความเข้าใจและเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนฟันฝ่าอุปสรรคต่างๆ ที่ผ่านเข้ามาในชีวิตและสามารถผ่านพ้นไปได้จนสำเร็จการศึกษาโดยเฉพาะบุตรทั้ง 2 คนผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งอย่างมาก

นอกจากนี้ผู้เขียนขอขอบคุณ เพื่อนร่วมรุ่น รุ่นพี่และรุ่นน้องนักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่านและหลายๆ ท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้และที่สำคัญขาดไม่ได้ คุณสารา เอียดเนียมและคุณเจริญพล อินขัน ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดีตลอดมา

สุดท้ายนี้สิ่งที่สำคัญที่สุดผู้เขียนขอกราบเท้าและน้อมรำลึกถึงพระคุณของบิดามารดาและสมาชิกทุกคนในครอบครัว ที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนฟันฝ่าอุปสรรคต่างๆ ที่ผ่านเข้ามาในชีวิต และสามารถผ่านพ้นไปได้จนสำเร็จการศึกษา

อรุณ สุวรรณสุนทร

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(13)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(19)
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
2 วรรณกรรมปริทัศน์	
2.1 ดินเหนียวอ่อน	7
2.2 ธรณีวิทยาทั่วไปของพื้นที่ภาคใต้	7
2.3 สภาพชั้นดินบริเวณชายฝั่ง	10
2.4 สภาพปัญหาทางวิศวกรรม	12
2.5 วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน	12
2.6 ประเภทดินซีเมนต์	17
2.7 กลไกการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยปูนซีเมนต์	18
2.8 โครงสร้างของดินซีเมนต์	20
2.9 สมบัติของดินที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว	21
2.10 องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของดินซีเมนต์หรือปูนขาว	22
2.11 สารปอซโซลาน	29
2.12 ข้าว	34
2.13 ไม้ยางพารา	35
2.14 การกระจายความเค็มในดิน	38
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
	(8)

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย
3.1	วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ 50
3.2	การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ 52
3.3	การทดสอบสมบัติของวัสดุ
3.3.1	การทดสอบสมบัติทางกายภาพของดินเหนียว เถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา 58
3.3.2	การทดสอบสมบัติทางเชิงกลของดินเหนียวสงขลา 58
3.3.3	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวสงขลา 59
3.3.4	การวิเคราะห์แร่ประกอบในเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา 59
3.3.5	การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา 60
3.3.6	วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา 60
3.4	การทดสอบสมบัติของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา
3.4.1	การทดสอบสมบัติทางกายภาพ 60
3.4.2	การทดสอบการบดอัด 60
3.4.3	การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว 61
3.4.4	การทดสอบอัตราแรงเบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย 62
3.4.5	การทดสอบอัดตัวคายน้ 62
3.4.6	การศึกษาองค์ประกอบแร่ 63
3.4.7	การศึกษาโครงสร้างจุลภาค 63
3.4.8	การทดสอบด้วยชุดทดสอบทางวิศวกรรม 63
4	ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลการศึกษา
4.1	ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของดินเหนียวอ่อนสงขลา (สภาพเดิม)
4.1.1	องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลา 68
4.1.2	สมบัติทางเคมีของดินเหนียวอ่อนสงขลา 68
4.1.3	สิ่งเจือปนในดินเหนียวอ่อนสงขลา 69
4.1.4	สมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนสงขลา 69
4.1.5	สมบัติทางเชิงกลของดินเหนียวอ่อนสงขลา 70
4.1.6	ผลการทดสอบการกระจายขนาด 70

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการทดสอบสมบัติของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา	74
4.2.1 สมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา	74
4.2.2 องค์ประกอบแร่ของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา	75
4.2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา	75
4.2.4 โครงสร้างจุลภาคของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา	77
4.3 ผลการหาค่าสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของดินเหนียวสงขลาหลังปรับปรุง	
4.3.1 สมบัติทางกายภาพของดินเหนียวสงขลาหลังปรับปรุง	80
4.3.2 ผลการบดอัดต่อดินเหนียวสงขลาและกรณีหลังปรับปรุง	88
4.3.3 กำลังอัดแกนเดี่ยวของดินเหนียวสงขลาและกรณีหลังปรับปรุง	96
4.3.4 ผลทดสอบอัตราส่วนแรงเบกทานของดินเหนียวสงขลาและหลังปรับปรุง	144
4.3.5 การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวสงขลาและกรณีหลังปรับปรุง	146
4.3.6 องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวสงขลาหลังปรับปรุง	156
4.3.7 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวอ่อนสงขลาหลังปรับปรุง	166
4.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Variable Regression)	179
5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการศึกษา	187
5.2 ข้อเสนอแนะ	188
บรรณานุกรม	189
ภาคผนวก	
ก พฤติกรรมกำลังอัดของดินเหนียวอ่อนสงขลา ก่อนและหลังจากผสม ด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราที่อายุการบ่มต่างๆ	197
ข ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Penetration ของผลการทดสอบค่าอัตราส่วน รับแรงเบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย (CBR)	211
ค ลายเส้น XRD ของดินตัวอย่างทุกอัตราส่วนผสมที่อายุบ่ม 28 วัน	213
การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์	226
ประวัติผู้เขียน	246
	(10)

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	วิธีปรับปรุงคุณภาพของดินที่ต่างชนิดกัน	13
2.2	ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับดินแต่ละประเภทจำแนกตามระบบเอกภาพ	24
2.3	ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับดินแต่ละประเภทจำแนกตามระบบ AASHTO	24
2.4	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ เถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา	33
2.5	พื้นที่เพาะปลูก และผลผลิต ของข้าวนาปีและนาปรังของประเทศไทย ปี 2547-2551	35
2.6	พื้นที่ปลูกยางพาราของประเทศไทย	36
2.7	แสดงค่าของ I_p ในรูปความสัมพันธ์ของ (r/z)	39
2.8	วิธีปรับปรุงคุณภาพของดินที่แปรผันตามขนาดเม็ดดิน	44
2.9	แนวทางเลือกใช้สารผสมเพิ่มกับวัสดุแต่ละชนิด	44
3.1	พลังงานที่ใช้ในการบดอัดโดยวิธีบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test) และการบดอัดโดยใช้ Mini Compactor	53
3.2	สัญลักษณ์ที่ใช้ในการกำหนดอัตราส่วนในการวิจัย	54
4.1	ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางเชิงกลและทางเคมีของดินเหนียวสงขลา	71
4.2	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวอ่อนสงขลา (SC) เถ้าแกลบ (RHA) และเถ้าไม้ยางพารา (RWA)	73
4.3	การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา	75
4.4	การแบ่งประเภทของสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618 ของเถ้าแกลบ (RHA) และเถ้าไม้ยางพารา (RWA)	76
4.5	พฤติกรรมทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนสงขลา ก่อนและหลังจากปรับปรุง	82
4.6	ผลการบดอัดแบบมาตรฐานของดินเหนียวสงขลา ก่อนและหลังจากปรับปรุง	89
4.7	พฤติกรรมทางกายภาพและเชิงกลของดินเหนียวอ่อนสงขลา ก่อนและหลังปรับปรุง	96
4.8	ผลการทดสอบอัตราส่วนแรงแบกทานแบบแคลิฟอร์เนียของดินเหนียวสงขลา และหลังปรับปรุงด้วย RHA20RWA30	145
4.9	ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการอัดตัวของดินเหนียวสงขลา (คงสภาพ) ดินเหนียวสงขลา (บดอัด) และกรณีหลังปรับปรุงด้วย RHA20RWA30	149

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมจากการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวสงขลา (คงสภาพ) ดินเหนียวสงขลา (บดอัด) และกรณีหลังปรับปรุงด้วย RHA20RWA30	152
4.11 องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลากรณีหลังปรับปรุงที่อายุการบ่ม 28 วัน	129
4.12 องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลาหลังปรับปรุงด้วย RHA50SC50 ที่อายุการบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน	160
4.13 องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลาหลังปรับปรุงด้วย RWA50SC50 ที่อายุการบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน	161
4.14 องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลาหลังปรับปรุงด้วย RHA50RWA50 ที่อายุการบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน	162
4.15 ความสัมพันธ์ของค่า UCS กับค่าสมบัติต่างๆ (วิเคราะห์ภาครวมทุกอัตราส่วน)	180
4.16 ความสัมพันธ์ของค่า E_{50} กับค่าสมบัติต่างๆ (วิเคราะห์ภาครวมทุกอัตราส่วน)	180
4.17 ความสัมพันธ์ของค่า ε_f กับค่าสมบัติต่างๆ (วิเคราะห์ภาครวมทุกอัตราส่วน)	180
4.18 ความสัมพันธ์ของค่า UCS กับค่าสมบัติต่างๆ (วิเคราะห์แยกแต่ละอัตราส่วน)	181
4.19 ความสัมพันธ์ของค่า E_{50} กับค่าสมบัติต่างๆ (วิเคราะห์แยกแต่ละอัตราส่วน)	183
4.20 ความสัมพันธ์ของค่า ε_f กับค่าสมบัติต่างๆ (วิเคราะห์แยกแต่ละอัตราส่วน)	185

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า	
1.1	การทรุดตัวของโครงสร้างอาคาร	2
1.2	การทรุดตัวของโครงสร้างถนน	3
2.1	ชายฝั่งทะเลทางภาคใต้	9
2.2	ชั้นดินบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา	11
2.3	แผนที่ลักษณะทางธรณีวิทยาลุ่มน้ำทะเลสงขลา	11
2.4	การเกาะตัวของสาร CSH ในโครงสร้างดินเหนียวผสมปูนขาว	16
2.5	Chemical Reaction between Soil and Hardening Agents	19
2.6	โครงสร้างของดินซีเมนต์	23
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมวลรวมที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 กับค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์	25
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเหนียวกับค่า Modulus of Elasticity	25
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์กับพื้นที่ผิวเม็ดดิน	26
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่ากำลังอัดแกนเดียว	28
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับระยะเวลาในการบ่มการทดลองในห้องปฏิบัติการ	28
2.12	ความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับอายุการบ่มของดินแต่ละชนิด	29
2.13	เข้าทั้ง 2 ชนิดที่นำมาใช้ในการศึกษา	37
2.14	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักที่กระทำเป็นจุดตามทฤษฎีของ Boussinesq	38
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่ากำลังอัดทุกอัตราส่วน	41
2.16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับปริมาณสารประสาน	45
2.17	พฤติกรรมทางเชิงกลดินเหนียวหลังปรับปรุง	47
2.18	พฤติกรรมของค่า Atterberg's Limit หลังปรับปรุงด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง	49
3.1	ดินเหนียวอ่อนสงขลาเป็นดินที่นำมาใช้ในการศึกษา	50
3.2	ที่มาและขั้นตอนการเตรียมเข้าเกลบ	51
3.3	ที่มาและขั้นตอนการเตรียมเข้าไม้ยางพารา	52
3.4	อุปกรณ์ของชุดทดสอบ Mini Compactor และเครื่องมือสำหรับการเตรียมก้อนตัวอย่าง	56
3.5	การบ่มดินตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว	57
3.6	น้ำหนักบรรทุกทุกพ่วงและน้ำหนักดินถมคันทางที่กระทำต่อชั้นดินปรับปรุงจุดที่ A	62

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 การทดสอบดินตัวอย่าง	64
3.8 ขั้นตอนการทดสอบดินเหนียวอ่อนสงขลาคงสภาพและเปลี่ยนสภาพ (บดอัด)	65
3.9 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา	66
3.10 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษาดินเหนียวอ่อนสงขลาที่ปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบ เถ้าไม้ยางพาราและเถ้าทั้งสองชนิด	67
4.1 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแร่	72
4.2 ผลการกระจายขนาดของดินเหนียวสงขลา (SC) เถ้าแกลบ (RHA) เถ้าไม้ยางพารา (RWA) และกรณีหลังจากผสมด้วยสูตร RHA20RWA30	74
4.3 โครงสร้างจุลภาคของเถ้าแกลบ	78
4.4 โครงสร้างจุลภาคของเถ้าไม้ยางพารา	79
4.5 พฤติกรรมทางกายภาพของค่าความถ่วงจำเพาะกับปริมาณของเถ้าแทนที่ ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%	84
4.6 พฤติกรรมทางกายภาพของค่าความถ่วงจำเพาะกับปริมาณของเถ้าแทนที่ ก) RWA 10-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข) RWA+RHA 30-50%	85
4.7 พฤติกรรมทางกายภาพของค่าพิกัดแอดเทอร์กับปริมาณเถ้าแทนที่ ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%	86
4.8 พฤติกรรมทางกายภาพของค่าพิกัดแอดเทอร์กับปริมาณเถ้าแทนที่ ก) RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข) RWA+RHA 30-50%	87
4.9 การแปรปรวนของคุณลักษณะการบดอัดของค่าหนาแน่นแห้งสูงสุดในดินตัวอย่าง ที่ผสม ก) RHA+RWA 10-30% และ ข) RHA 5-50% และ RHA+RWA 35-50%	92
4.10 การแปรปรวนของคุณลักษณะการบดอัดของค่าหนาแน่นแห้งสูงสุดในดินตัวอย่าง ที่ผสม ก) RWA+RHA 10-30% และ ข) RWA 5-50% และ RWA+RHA 35-50%	93
4.11 การแปรปรวนของคุณลักษณะการบดอัดของค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมในดินตัวอย่าง ที่ผสมกับ ก) RHA+RWA 10-30% และ ข) RHA 5-50% และ RHA+RWA 35-50%	94
4.12 การแปรปรวนของคุณลักษณะการบดอัดของค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมในดินตัวอย่าง ที่ผสมกับ ก) RWA+RHA 10-30% และ ข) RWA 5-50% และ RWA+RHA 35-50%	95

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ผลกระทบต่อการเติมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อกำลัษณ์ของดินปรับปรุงที่อายุบ่ม 1 วัน ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%	110
4.14 ผลกระทบต่อการเติมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าแกลบต่อกำลัษณ์ของดินปรับปรุงที่อายุบ่ม 1 วัน ก) RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข) RWA+RHA 30-50%	111
4.15 ผลกระทบต่อการเติมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อกำลัษณ์ของดินปรับปรุงที่อายุบ่ม 7 วัน ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%	112
4.16 ผลกระทบต่อการเติมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าแกลบต่อกำลัษณ์ของดินปรับปรุงที่อายุบ่ม 7 วัน (ก) RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข) RWA+RHA 30-50%	113
4.17 ผลกระทบต่อการเติมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อกำลัษณ์ของดินปรับปรุงที่อายุบ่ม 14 วัน (ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%	114
4.18 ผลกระทบต่อการเติมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าแกลบต่อกำลัษณ์ของดินปรับปรุงที่อายุบ่ม 14 วัน (ก) RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข) RWA+RHA 30-50%	115
4.19 ผลกระทบต่อการเติมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อกำลัษณ์ของดินปรับปรุงที่อายุบ่ม 28 วัน ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%	116
4.20 ผลกระทบต่อการเติมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าไม้แกลบต่อกำลัษณ์ของดินปรับปรุงที่อายุบ่ม 28 วัน ก) RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข) RWA+RHA 30-50%	117
4.21 ผลกระทบต่อการเติมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อกำลัษณ์ของดินปรับปรุงที่อายุบ่ม 56 วัน ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%	118
4.22 ผลกระทบต่อการเติมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าแกลบต่อกำลัษณ์ของดินปรับปรุงที่อายุบ่ม 56 วัน ก) RWA 5-50% RWA+RHA 10-25% และ ข) RWA+RHA 30-50%	119
4.23 พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราที่อายุบ่ม 1 วัน ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%	122
4.24 พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าแกลบที่อายุบ่ม 1 วัน ก) RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข) RWA+RHA 30-50%	123
4.25 พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราที่อายุบ่ม 7 วัน ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%	124

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.26	พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าแกลบที่อายุบ่ม 7 วัน ก) RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข) RWA+RHA 30-50%	125
4.27	พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราที่อายุบ่ม 14 วัน ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%	126
4.28	พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าแกลบที่อายุบ่ม 14 วัน ก) RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข) RWA+RHA 30-50%	127
4.29	พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราที่อายุบ่ม 28 วัน ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%	128
4.30	พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราที่อายุบ่ม 28 วัน ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%	129
4.31	พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราที่อายุบ่ม 56 วัน ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%	130
4.32	พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าแกลบที่อายุบ่ม 56 วัน ก) RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข) RWA+RHA 30-50%	131
4.33	ผลกระทบของดินที่เติมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อความเครียดที่จุดวิบัติที่อายุบ่ม 1 วัน ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%	134
4.34	ผลกระทบของดินที่เติมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อความเครียดที่จุดวิบัติที่อายุบ่ม 1 วัน ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%	135
4.35	ผลกระทบของดินที่เติมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อความเครียดที่จุดวิบัติที่อายุบ่ม 7 วัน ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%	136
4.36	ผลกระทบของดินที่เติมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าแกลบต่อความเครียดที่จุดวิบัติที่อายุบ่ม 7 วัน ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%	137
4.37	ผลกระทบของดินที่เติมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อความเครียดที่จุดวิบัติ ที่อายุบ่ม 14 วัน ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%	138

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.38 ผลกระทบของดินที่เติมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าไม้แกลบต่อความเครียดที่จุดวิกฤติที่อายุบ่ม 14 วัน ก) RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข) RWA+RHA 30-50%	139
4.39 ผลกระทบของดินที่เติมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อความเครียดที่จุดวิกฤติที่อายุบ่ม 28 วัน ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%	140
4.40 ผลกระทบของดินที่เติมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าไม้แกลบต่อความเครียดที่จุดวิกฤติที่อายุบ่ม 28 วัน ก) RWA 5-50%, RWA+RHA 10-25% และ ข) RWA+RHA 30-50%	141
4.41 ผลกระทบของดินที่เติมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าไม้แกลบต่อความเครียดที่จุดวิกฤติที่อายุบ่ม 28 วัน ก) RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข) RWA+RHA 30-50%	142
4.42 ผลกระทบของดินที่เติมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าไม้แกลบต่อความเครียดที่จุดวิกฤติที่อายุบ่ม 56 วัน ก) RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข) RWA+RHA 30-50%	143
4.43 พฤติกรรมของค่าอัตราส่วนกำลังแบกทานแบบแคลิฟอร์เนียของดินเหนียวสงขลาและหลังปรับปรุงด้วยสูตร RHA20RWA30 กับอายุบ่ม	145
4.44 ภาพวาดร่างโครงสร้างดินเหนียวสงขลา ก) ปริมาณช่องว่างดินเดิม (บดอัด) และ ข) ปริมาณช่องว่างดินหลังปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบ 20% และเถ้าไม้ยางพารา 30%	148
4.45 ภาพวาดการเกิดสารแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) จากปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮดรชัน ในโครงสร้างดินเหนียวอ่อนสงขลาหลังปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา	148
4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับอัตราส่วนโพรงของดินเหนียวสงขลา (คงสภาพ)	149
4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับอัตราส่วนโพรงของดินเหนียวอ่อนสงขลา (บดอัด) และกรณีหลังปรับปรุงด้วยสูตร RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 14 วัน	150
4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับอัตราส่วนโพรงของดินเหนียวสงขลา (บดอัด) และกรณีหลังปรับปรุงด้วยสูตร RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 7 และ 14 วัน	152
4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนสงขลา	153

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวของดินเหนียวอ่อนสงขลา (บดอัด) และกรณีหลังปรับปรุงด้วยสูตร RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 14 วัน	153
4.51 พฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวของดินเหนียวอ่อนสงขลาและดินเหนียวอ่อนสงขลา (บดอัด) กรณีหลังปรับปรุงด้วยสูตร RHA20RWA30	154
4.52 พฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นผ่านได้ของดินเหนียวอ่อนสงขลาคงสภาพ	154
4.53 พฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นผ่านได้ของดินเหนียวอ่อนสงขลา (บดอัด) กรณีหลังปรับปรุงด้วย RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 14 วัน	155
4.54 พฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นผ่านได้ของดินเหนียวอ่อนสงขลา (บดอัด) กรณีหลังปรับปรุงด้วย RHA20RWA30	155
4.55 การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานแลปฏิกิริยาไฮเดรของวัสดุปอซโซลาน	156
4.56 ผลวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลาหลังกรณีหลังปรับปรุงด้วยสูตร RHA50SC50 ที่อายุบ่ม ก) 7 วัน ข) 14 วัน ค) 28 วัน และ ง) 56 วัน	163
4.57 ผลวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลากรณีหลังปรับปรุงด้วยสูตร RHA50SC50 ที่อายุบ่ม ก) 7 วัน ข) 14 วัน ค) 28 วัน และ ง) 56 วัน	164
4.58 ผลวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลากรณีหลังปรับปรุงด้วยสูตร RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม ก) 7 วัน ข) 14 วัน ค) 28 วัน และ ง) 56 วัน	165
4.59 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลากรณีหลังจากปรับปรุงสมบัติด้วยสูตร RHA50SC50 ที่อายุบ่ม 7 วัน ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า และ ค) กำลังขยาย 8,000 เท่า	167
4.60 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลากรณีหลังจากปรับปรุงสมบัติด้วย RHA50SC50 ที่อายุบ่ม 14 วัน ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า และ ค) กำลังขยาย 8,000 เท่า	168
4.61 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลากรณีหลังจากปรับปรุงสมบัติด้วย RHA50SC50 ที่อายุบ่ม 28 วัน ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า และ ค) กำลังขยาย 8,000 เท่า	169

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.62	โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลากรณีหลังจากปรับปรุงสมบัติด้วย RHA50SC50 ที่อายุบ่ม 56 วัน ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า ค) กำลังขยาย 8,000 เท่า	170
4.63	โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลากรณีหลังจากปรับปรุงสมบัติด้วย RWA50SC50 ที่อายุบ่ม 7 วัน ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า และ ค) กำลังขยาย 8,000 เท่า	171
4.64	โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลากรณีหลังจากปรับปรุงสมบัติด้วย RWA50SC50 ที่อายุบ่ม 14 วัน ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า ค) กำลังขยาย 8,000 เท่า	172
4.65	โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลากรณีหลังจากปรับปรุงสมบัติด้วย RWA50SC50 ที่อายุบ่ม 28 วัน ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า ค) กำลังขยาย 8,000 เท่า	173
4.66	โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลากรณีหลังจากปรับปรุงสมบัติด้วย RWA50SC50 ที่อายุบ่ม 56 วัน ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า ค) กำลังขยาย 8,000 เท่า	174
4.67	โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลากรณีหลังจากปรับปรุงสมบัติด้วยสูตร RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 7 วัน ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า ค) กำลังขยาย 8,000 เท่า	175
4.68	โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลากรณีหลังจากปรับปรุงสมบัติด้วยสูตร RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 14 วัน ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า และ ค) กำลังขยาย 8,000 เท่า	176
4.69	โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลากรณีหลังจากปรับปรุงสมบัติด้วยสูตร RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 28 วัน ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า ค) กำลังขยาย 8,000 เท่า	177
4.70	โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลากรณีหลังจากปรับปรุงสมบัติด้วยสูตร RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 56 วัน ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า และ ค) กำลังขยาย 8,000 เท่า	178

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

SC	=	ดินเหนียวอ่อนสงขลา (Songkhla Soft Clay)
LL	=	ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit)
PL	=	ค่าพิกัดพลาสติก (Plasticity Limit)
NWC	=	ค่าความชื้นตามธรรมชาติ (Natural Water Content)
OMC	=	ค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content)
RHA	=	เถ้าแกลบ (Rice Husk Ask)
RHA	=	เถ้าไม้ยางพารา (Rubber Wood Ask)
UCS	=	ค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength)
SEM	=	ภาพถ่ายจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
XRF	=	วิธีตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence)
XRD	=	วิธีตรวจชนิดแร่ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction)
MIT	=	สถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซตส์ (Massachusetts Institute of Technology)
USCS	=	ระบบจำแนกดินเอกภาพ (Unified Soil Classification System)
T	=	อายุการบ่ม, วัน (Curing Time)
ϵ_f	=	ความเครียดที่จุดวิบัติ (Strain at Failure)
w	=	ปริมาณความชื้น (Water Content)
CSH	=	แคลเซียม ซิลิเกต ไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate)
CAH	=	แคลเซียม อะลูมินาต ไฮเดรต (Calcium Aluminate Hydrate)
Gs	=	ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)
I	=	อิลไลต์ (Illite)
E_{50}	=	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ร้อยละ 50 (Modulus of Elasticity)
k	=	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability)
C_c	=	ค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index)
C_r	=	ค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (ReCompression Index)
C_v	=	ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัว (Coefficient of Consolidation)
γ_t	=	หน่วยน้ำหนักรวม (Total Unit Weight)
Q	=	ควอตซ์ (Quartz)

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

C	=	แคลไซต์ (Calcite)
K	=	เคโอลิไนต์ (Kaolinite)
P'_c	=	ความดันดินเคยอัดตัวมาก่อน (Pre-consolidation Pressure)
SiO_2	=	ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide)
Al_2O_3	=	อะลูมิเนียมไดออกไซด์ (Aluminum oxide)
Fe_2O_3	=	ไอรอนออกไซด์ (Iron oxide)
CaO	=	แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide)
MgO	=	แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide)
γ_d	=	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

พื้นที่บริเวณที่ราบลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาในประเทศไทย เป็นบริเวณพื้นที่ที่เกิดจากตะกอนดินที่ทับถมกันในเขตภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ อันเป็นผลมาจากการพัดพาของแม่น้ำ และการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำทะเลบริเวณพื้นที่ดังกล่าวมีอาณาเขตติดกับทะเลอ่าวไทย โดยเฉพาะที่ตั้งบริเวณอำเภอเมือง จังหวัดสงขลา ซึ่งมีประชากรอาศัยอยู่หนาแน่นและมีการสร้างสาธารณูปโภคต่างๆ เพื่อรองรับการเจริญเติบโตของชุมชนลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา

ซึ่งการก่อสร้างสิ่งต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอาคาร ถนน เป็นต้น บนชั้นดินเหนียวอ่อน นั้นก่อให้เกิดปัญหาทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิคมากมายเช่น ปัญหาการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อน เนื่องจากดินเหนียวอ่อนรับน้ำหนักได้น้อยมากหรือไม่ได้เลย ไม่ว่าจะเป็นสิ่งปลูกสร้างขนาดใหญ่หรือเล็กก็ล้วนประสบกับปัญหาทั้งสิ้น และปัญหาที่ตามมาเมื่อมีการปลูกสร้างต่างๆ บนชั้นดินเหนียวอ่อน คือ การเสียหายของสิ่งปลูกสร้างต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอาคาร ผิวจราจร นั้นหมายถึง ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการรื้อถอนหรือดำเนินการก่อสร้างต่างๆ ดังกล่าวขึ้นมาใหม่ ซึ่งจากสำรวจปัญหาก่อให้เกิดความเสียหายกับสิ่งปลูกสร้างใน อำเภอเมืองสงขลา พบจากปัญหาสภาพดินอ่อน ดังต่อไปนี้

1) การทรุดตัวของอาคาร โดยมักเกิดจากใช้เสาเข็มเสียดทาน (Friction Piles) เนื่องจากสภาพชั้นดินเหนียวอ่อนมีความหนาค่อนข้างมาก ซึ่งอาจก่อให้เกิดการทรุดตัวบริเวณปลายเข็ม แสดงดังรูปที่ 1.1

2) การทรุดตัวที่บริเวณคอสะพานเนื่องจาก โครงสร้างสะพานใช้ฐานรากเสาเข็ม (Pile Foundation) แต่โครงสร้างถนนถูกวางอยู่บนดินเดิม จึงเกิดการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน (Differential Settlement) ดังรูปที่ 1.2

3) เกิดความเสียหายตรงผิวจราจรเนื่องจากดินชั้นคันทาง (ดินเดิมที่เป็นดินเหนียวอ่อนเกิดการทรุดตัว) ส่งผลให้ถนนเกิดทรุดตัว ดังรูปที่ 1.2

4) เกิดการพังทลายของไหล่ทางเนื่องจากดินชั้นคันทาง (ดินเดิมที่เป็นดินเหนียวอ่อนเกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกัน) ส่งผลให้ไหล่ทางเกิดทรุดตัว ดังรูปที่ 1.2

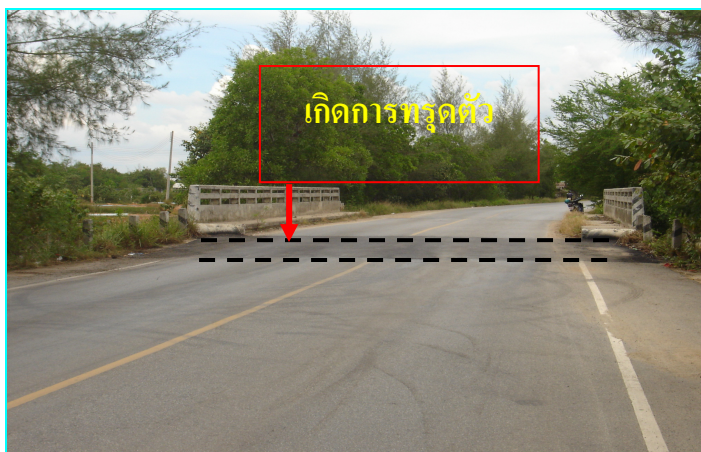


ก)



ข)

รูปที่ 1.1 การทรุดตัวของโครงสร้างอาคาร ก) อาคารทางด้านขวาเกิดการเอียงประมาณ 2 องศา บนถนนสายนางงาม 2 และ ข) บ้านพักอาศัยชั้นเดียวเกิดการเอียงประมาณ 2 องศา บนถนนเก้าเส้ง



ก) คอสะพานถนนเลียบชายทะเลบริเวณใกล้สะพานติณสูลานนท์เกิดทรุดตัว



ข) ถนนเลียบป่าชายเลนบริเวณชุมชนเก่าเส้ง ผิวจราจรเกิดการทรุดต่าระดับ



ค) ถนนสายหลังโรงพยาบาลสงขลา ปี 2549 เกิดการวิบัติแบบเสถียรภาพความลาด

รูปที่ 1.2 การทรุดตัวของโครงสร้างถนนบนชั้นดินอ่อนในอำเภอเมืองจังหวัดสงขลา

ดังนั้น จึงต้องใช้งบประมาณในการก่อสร้างสูงเพราะหน่วยงานต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นของรัฐหรือเอกชนได้นำเอาเทคนิคการปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนมาปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพของดินบริเวณพื้นที่ที่จะทำการก่อสร้าง เพื่อลดปัญหาหรือเพิ่มคุณภาพของดินเหนียวอ่อนด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค ซึ่งปัจจุบันได้มีการใช้เทคนิคในการปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพของดินเหนียวอ่อนมีด้วยกันหลายวิธี โดยแบ่งออกได้ดังนี้

1. การปรับปรุงเสถียรภาพของดินโดยใช้พลังงานหรือเครื่องจักรกล (Mechanical Stabilization)
2. การปรับปรุงเสถียรภาพของดินโดยการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ (Thermal Stabilization)
3. การปรับปรุงเสถียรภาพของดินโดยการใช้ประจุไฟฟ้า
4. การปรับปรุงเสถียรภาพโดยการเติมสารเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เช่น เสาปูนขาว (Lime Column) เสาซีเมนต์ (Cement Column) ดินซีเมนต์ (Soil Cement) เป็นต้น

จากที่กล่าวมาเป็นเทคนิคการปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพของดินเหนียวอ่อน เพื่อให้มีคุณภาพทางด้านวิศวกรรมดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นด้านการรับน้ำหนัก ลดการทรุดตัว และลดค่าการบวมตัวของดินเหนียวอ่อน จึงเป็นที่มาของการทำโครงการวิจัยเพื่อนำเสนอแนวทางการปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพของดินเหนียวอ่อนอีกวิธีหนึ่ง โดยการใช้วัสดุที่มีอยู่มากมายในท้องถิ่นและเพื่อรักษาสภาพแวดล้อม ในการศึกษาได้ใช้ดินเหนียวอ่อนจากบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา อำเภอเมืองจังหวัดสงขลา โดยนำเอาเถ้าแกลบจากการเผาถ่านหรืออิฐและเถ้าไม้ยางพารา ซึ่งได้จากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ไปเป็นเชื้อเพลิงหม้อต้มน้ำและเผาถ่าน สิ่งที่เกิดจากกิจกรรมดังกล่าวมีอยู่มากมายในพื้นที่ และไม่มีราคามาใช้ให้เกิดประโยชน์กับงานทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค รวมถึงเป็นการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด ผลการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนได้ก็สามารถนำเอาเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าแกลบ ซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมพืชทั้งสองชนิดที่มีปริมาณมหาศาลและไม่มีประโยชน์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ และสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงเป็นการพัฒนาเทคนิคทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน โดยคำนึงถึงระบบนิเวศน์เป็นหลักแล้วยังสามารถขยายผลปรับปรุงพัฒนาคุณภาพด้านวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนในพื้นที่อื่นๆ ของประเทศที่มีลักษณะปัญหาของดินในทำนองเดียวกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) ศึกษาพฤติกรรมทางธรณีเทคนิคของดินเหนียวอ่อนสงขลาที่คงสภาพ (Undisturbed) และเปลี่ยนสภาพ (Disturbed)
- 2) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนสงขลาผสมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราในอัตราส่วนและอายุบ่มต่างกัน
- 3) ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวอ่อนสงขลาที่ผ่านการปรับปรุง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ดินเหนียวอ่อนที่นำมาศึกษาวิจัยครั้งนี้ให้นำมาจากบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาในเขตเทศบาลนครสงขลา จังหวัดสงขลา เก็บดินตัวอย่างที่คงสภาพและเปลี่ยนเสียสภาพที่ระดับความลึก 1.5-2.0 เมตร จากผิวดินเดิม
 - 2) ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานทางเคมีและสมบัติด้านตัวบ่งชี้ของเถ้าไม้ยางพารา เถ้าแกลบและดินเหนียวอ่อนลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา โดยทางเคมีตรวจสอบด้วยเทคนิคการวางแสงรังสีเอ็กซ์ (X-ray Fluorescence-XRF) การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction-XRD) และวิธีภาพถ่ายจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope-SEM) ส่วนการศึกษาทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการทดสอบเพื่อหาค่าสมบัติพื้นฐานทางด้านตัวบ่งชี้ (Index) ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ พิ๊คัดแอดเตอร์เบิร์ก และ การกระจายขนาด
 - 3) การเตรียมก้อนตัวอย่างทดสอบด้วยวิธีทดสอบการบดอัดตามแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test) โดยผสมเถ้าแต่ละชนิดและเถ้าทั้งสองรวมกันในอัตราส่วน 5:95 10:90 15:85 20:80 25:75 30:70 35:65 40:60 50:50 ของกรณีเถ้าแต่ละชนิดและ 5+5:90 5+5:90 5+10:85 10+5:85 5+15:80 10+10:80 15+5:80 5+20:75 10+15:75 15+10:75 20+5:75 5+25:70 10+20:70 15+15:70 20+10:70 25+5:70 5+30:65 15+20 20+15:65 30+5:65 5+35:60 10:30:60 20+20:60 30+10:60 35+5:60 10+40:50 20+30:50 25+25:50 30+20:50 และ 40+10:50 ของกรณีเถ้าทั้งสองชนิดรวมกันและบ่มภายใต้บรรยากาศในห้องปฏิบัติการจากนั้นทดสอบเป็นระยะ 5 ชั่วโมง คือ 1 7 14 28 และ 56 วัน
- หมายเหตุ สัญลักษณ์ของอัตราส่วนผสม กรณีเถ้าชนิดเดียว RHA:SC และ RWA:SC และกรณีเถ้าทั้งสองชนิด RHA+RWA:SC

สำหรับสมบัติทางเชิงกล ได้แก่ กำลังอัดแกนเดี่ยว (Unconfined Compression Strength) อัตราส่วนกำลังแบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย (California Bearing Ratio, CBR) แบบไม่แช่น้ำและการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) แบบมีติเดี่ยว ดำเนินการทดสอบเฉพาะอัตราส่วนผสมที่มีกำลังอัดแกนเดี่ยวสูงสุดเท่านั้น

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของก้อนทดสอบที่ผสมเข้าแต่ละชนิดและเข้าทั้งสองชนิดรวมกันที่อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) และโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างทดสอบที่มีกำลังอัดแกนเดี่ยวสูงสุดที่ทุกอายุการบ่มด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เป็นส่วนช่วยจัดทำอนุกรมวิธานของสมบัติทางวิศวกรรมธรณีเทคนิค
- 2) ทราบแนวทางการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน เพื่อนำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค เช่น ดินคันทาง หลุมฝังกลบขยะมูลฝอย
- 3) เป็นการนำเอาเศษวัสดุที่เหลือใช้จากงานอุตสาหกรรมการเกษตรซึ่งไม่มีมูลค่ามาใช้ให้เกิดประโยชน์ในงานวิศวกรรม
- 4) เป็นการกำจัดเศษวัสดุเหลือใช้ทำให้สิ่งแวดล้อมในพื้นที่บริเวณโรงงานดีขึ้น
- 5) เป็นการเพิ่มวัสดุทดแทนในงานวิศวกรรมการทาง
- 6) เป็นการเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกร

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 ดินเหนียวอ่อน (Soft Clayey Soil)

ดินเหนียวอ่อน (Soft Clayey Soil) หมายถึง ดินที่มีขนาดดินเม็ดละเอียดอยู่ในปริมาณมาก มีปริมาณความชื้นสูงและมีปริมาณสารอินทรีย์สูงด้วย (ศุภกิจ, 2537) แร่ดิน (Clay Minerals) ส่วนใหญ่มักเป็นแร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite) อิลไลต์ (Illite) และมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ซึ่งเป็นหมู่แร่ไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิเกต (Hydrous Aluminum Silicate) ดินเหนียวแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกันไปตามชนิดของแร่ที่เป็นองค์ประกอบโครงสร้างการรวมตัวของอนุภาคเม็ดดินรวมทั้งปริมาณน้ำในมวลดินด้วย ดินเหนียวโดยทั่วไปเป็นเม็ดดินที่ตกตะกอนอยู่บริเวณปากแม่น้ำที่ราบลุ่ม โดยลักษณะการเกิดของดินเหนียวอ่อนบริเวณนี้จะมีทั้งแบบตกตะกอนในแม่น้ำและในทะเล เนื่องจากเม็ดดินจะพัดพาจากแม่น้ำลงสู่ทะเล ในขณะที่เดียวกันก็มีการหมุนตัวกลับของน้ำทะเลทำให้เกิดการตกตะกอน ซึ่งเป็นลักษณะการเกิดดินตะกอนบริเวณที่ลุ่มน้ำทะเลสงขลาหรือเรียกว่า ดินเหนียวสงขลา (Songkla Clay) ดังรูปที่ 2.1

2.2 ธรณีวิทยาทั่วไปของพื้นที่ภาคใต้

อภิชัย (2546) ได้เสนอข้อมูลสภาพทางธรณีและลักษณะของชั้นดินบริเวณภาคใต้ ดังนี้ ภาคใต้มีลักษณะแหลมยื่นออกไปในทะเล ด้านตะวันออกติดกับอ่าวไทย ส่วนด้านตะวันตกติดทะเลอันดามัน ทางเหนือเริ่มจากบริเวณอำเภอท่าพระ จังหวัดชุมพร ลงไปทางใต้สุดจรดประเทศมาเลเซีย ความยาวจากเหนือมาใต้ประมาณ 610 กิโลเมตร มีความกว้างระหว่าง 220 กิโลเมตร จากฝั่งตะวันออกของอำเภอปากพนัง ไปจนถึงฝั่งตะวันตกของอำเภอท้ายเหมือง จังหวัดพังงา ส่วนแคบสุดของคาบสมุทรอยู่ที่บริเวณคอคอดกระมีความกว้างประมาณ 64 กิโลเมตร ประกอบด้วย จังหวัดต่างๆ 14 จังหวัด ทางริมฝั่งทะเลด้านตะวันออก ได้แก่ จังหวัดชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช สงขลา ปัตตานี และนราธิวาส ส่วนริมฝั่งทะเลด้านตะวันตก ได้แก่ จังหวัดระนอง พังงา ภูเก็ต กระบี่ ตรังและสตูล ส่วนจังหวัดที่ไม่ติดกับทะเล ได้แก่ จังหวัดพัทลุงและจังหวัดยะลา การเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาของชายฝั่งทางภาคใต้เริ่มในช่วงประมาณ 10,000 ปีที่แล้ว (Chaimanee, 1988) โดย

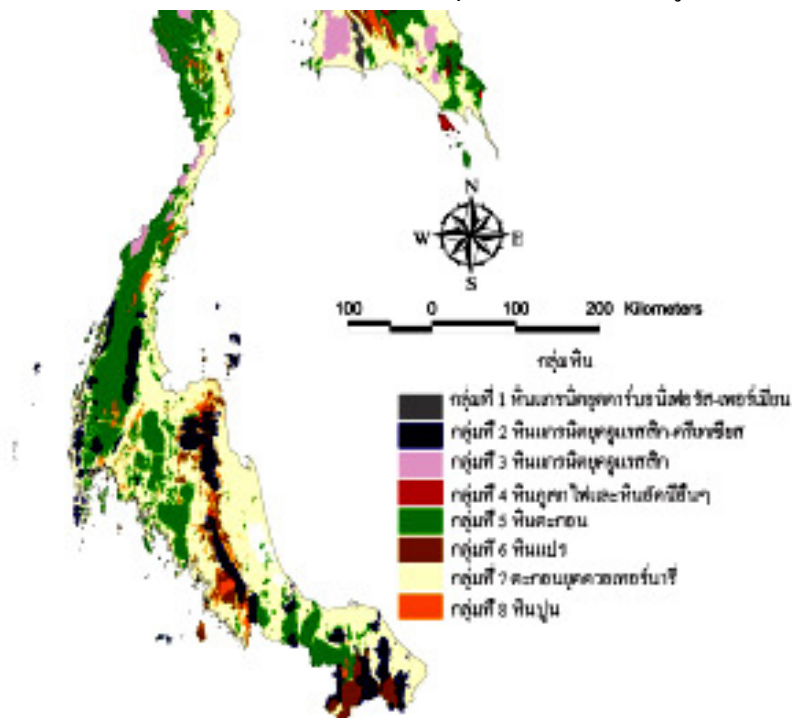
คาบสมุทรทางใต้ได้มีการด้วยตัวเอียงไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ทำให้ชายฝั่งทะเลด้านทิศตะวันออกยกตัวขึ้นและชายฝั่งด้านตะวันตกจมลง ประกอบกับการลดลงของระดับน้ำทะเลฝั่งทะเลตะวันออกที่เคยจมอยู่ใต้น้ำถูกยกขึ้นสูงกว่าระดับน้ำทะเล เกิดเป็นที่ราบกว้างชายฝั่งที่มีระดับต่ำกว่าที่ราบเดิม เกิดเป็นตะพักน้ำทะเลขึ้นมาใหม่ แนวชายฝั่งทะเลบริเวณนี้จะมีลักษณะค่อนข้างราบเรียบ นอกจากนี้การยกตัวขึ้นของแผ่นดินทำให้แม่น้ำต้องมีการปรับการไหล และการกัดเซาะ โดยลำน้ำจะกัดเซาะบริเวณกลางและปลายน้ำให้ลึกลงไป ทำให้มีตะพักแม่น้ำใหม่เกิดขึ้น สภาพภูมิประเทศลำน้ำในบริเวณนี้จึงมีการกัดเซาะในลักษณะของรูปตัวยู

บริเวณที่ราบลุ่มชายทะเลจะมีขนาดแคบทางตอนเหนือของอ่าวบ้านดอนและขยายกว้างขึ้นระหว่างจังหวัดนครศรีธรรมราชจนถึงจังหวัดนราธิวาส ที่ราบในบริเวณนี้เกิดจากกระแสน้ำและคลื่นพัดพาทรายมากองก่อดำเนินเป็นสันทรายริมฝั่ง สันทรายนี้จะงอกเป็นแหลมออกไปในทะเล การก่อดำเนินของสันทรายริมทะเลเป็นแหลมยื่นออกไปที่มีขนาดใหญ่และเห็นได้ชัดเจน คือ แหลมตะลุมพุก จังหวัดนครศรีธรรมราช แหลมสนอ่อน จังหวัดสงขลาและแหลมตาชี จังหวัดปัตตานี เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งแหลมที่ยื่นไปก็จะปิดบริเวณที่เป็นอ่าว ทำให้เกิดแอ่งน้ำหลังสันทรายขึ้น เรียกว่า ลากูน ทะเลสาบสงขลาที่เกิดจากกระบวนการนี้เช่นกัน ซึ่งลากูนเหล่านี้ต่อมาจะตื้นเขินและมีดิน โกงกางหรือไม้ไผ่อย่างอื่นขึ้น กลายเป็นป่าพรุหลังแนวชายหาดไป ปัจจุบันและดินในบริเวณนี้จะเกิดจากการทับถมของดินไม้เหล่านี้กลายเป็นดินพรุ ซึ่งพบได้ทั่วไปหลังสันทรายในบริเวณจังหวัดปัตตานีและจังหวัดนราธิวาส ลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปจะมีระดับความสูงน้อยกว่า 10 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล

การยกตัวของชายฝั่งทะเลด้านตะวันออกทำให้ชายฝั่งด้านตะวันตกจมลง บริเวณที่เป็นชายหาดเดิมจะจมลงใต้ทะเลทำให้ที่ราบริมทะเลมีน้อยลงและผลอันนี้ยังทำให้ชายฝั่งมีรูปร่างเว้าแหว่งมาก มีลักษณะเป็นอ่าวสลับกับแหลมและมีเกาะต่างๆ อยู่นอกชายฝั่งเป็นจำนวนมากมายในบางบริเวณจะมีภูเขาปิดล้อมชายหาด จากการที่ทิวเขาขนาดใหญ่อยู่ชิดชายฝั่ง เมื่อชายฝั่งจมลงลำน้ำในบริเวณนี้ก็จะปรับตัวกัดเซาะบริเวณต้นน้ำลงเป็นร่องลึกลงไปอีก ทำให้ในบริเวณนี้ นอกจากจะมีที่ราบฝั่งน้อยแล้ว สภาพร่องน้ำจะเป็นร่องลึกรูปตัววี ต่างจากร่องน้ำฝั่งตะวันออก ซึ่งจะเป็นร่องกว้างตื้นและมีตะพักลำน้ำหลายระดับแทนจะไม่พบในชายฝั่งด้านนี้รูปที่ 2.1 แสดงบริเวณที่เคยเป็นชายฝั่งทะเลในอดีตเทียบกับปัจจุบัน ในบริเวณภาคใต้ ให้เห็นอย่างชัดเจนในตัวอำเภอเมือง จังหวัดสงขลา ตั้งอยู่ตามแนวสันทรายเก่าและอยู่ห่างจากสันทรายริมทะเลปัจจุบันประมาณ 12 กิโลเมตร นอกจากนี้ยังมีร่องรอยเก่าให้เห็นเป็นแนวยาวในบริเวณด้านทิศตะวันตกของตัวเมือง

สภาพธรณีวิทยาของพื้นที่ อำเภอเมืองในเขตเทศบาลนครสงขลา จังหวัดสงขลา ได้จากการศึกษาในเบื้องต้นโดยการรวบรวมข้อมูลเก่าที่ได้มีการศึกษาไว้แล้ว ได้แก่ แผนที่ธรณีวิทยา

ประเทศไทยมาตราส่วน 1:1,000,000 (กรมทรัพยากรธรณี, 2544) และทำการสำรวจข้อมูลเพิ่มเติมพบว่าธรณีวิทยาของบริเวณพื้นที่ประกอบด้วยหมวดหินยุคควอเทอร์นารี ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สภาพดินชายฝั่งทะเลทางภาคใต้

ที่มา: ดัดแปลงจากกรมทรัพยากรธรณี (2544)

หินยุคควอเทอร์นารี (Quaternary) ประกอบด้วย ชั้นของกรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ซึ่งเกิดจากการพัดพามาสะสมของทางน้ำบริเวณที่ราบเชิงเขาและที่ราบลุ่มแม่น้ำรวมทั้งตะกอนที่เกิดจากการพัดพามาสะสมโดยน้ำทะเล การสะสมตัวของตะกอนตามบริเวณเชิงเขา นอกจากเกิดจากการพัดพามาสะสมของทางน้ำแล้ว บางบริเวณยังอาจเกิดจากการสะสมตัวของตะกอนที่เกิดจากการผุพังของหินโดยกระบวนการทางกายภาพและเคมี ทำให้เกิดการสะสมตัวอยู่กับที่ หินยุคควอเทอร์นารี เป็นชั้นของตะกอนร่วม บางส่วนจะถูกเปลี่ยนแปลงโดยกระบวนการทางเคมีทำให้เกิดเป็นซิลิกาแลง อายุของตะกอนอยู่ในช่วงประมาณ 1.6 ล้านปี ถึงปัจจุบัน ตะกอนเหล่านี้สามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทย่อยๆ ดังนี้

1) สันทรายชายหาด (Beach Sand Deposits, Qb) เป็นชั้นตะกอนทรายขนาดหยาบถึงละเอียดที่เกิดจากการพัดพามาสะสมตัวโดยน้ำทะเล พบอยู่ตามที่ราบชายฝั่งทะเลต่างๆ

2) ตะกอนดินเหนียวชายทะเล (Mangrove Deposits, Qm) เป็นชั้นตะกอนดินเหนียวที่เกิดจากการพัดพามาสะสมตัวโดยน้ำทะเล ส่วนมากพบบริเวณที่เป็นป่าชายเลนและป่าพรุที่มีน้ำท่วมถึง

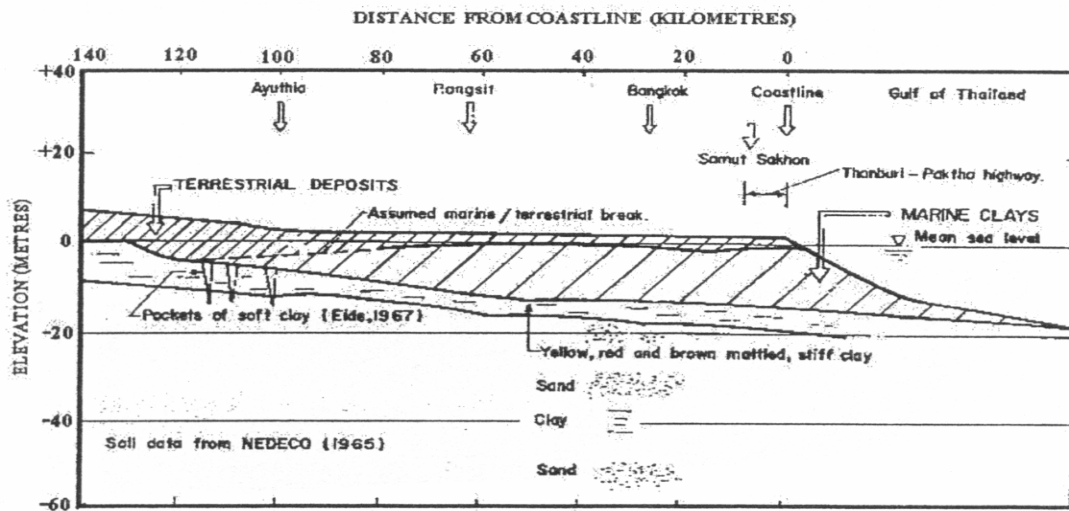
3) ตะกอนดินน้ำพา (Alluvium Deposits, Qa) ประกอบด้วยชั้นกรวดปนทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวที่ถูกพัดพามาโดยแม่น้ำและสะสมตัวอยู่บริเวณที่ราบน้ำท่วมถึงและที่ราบลุ่มแม่น้ำต่างๆ

4) ตะกอนเศษหินเชิงเขา (Terrace Deposits, Qt) เป็นตะกอนเศษดินและหินที่ผุพังมาจากหินบริเวณเชิงเขาและตกตะกอนทับถมเป็นที่ราบบริเวณเชิงเขา ลักษณะของตะกอนมักมีขนาดต่างๆ กัน มีความเหลี่ยมคมสูง การคัดขนาดไม่ดี ส่วนประกอบของชั้นตะกอนชนิดนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของหินต้นกำเนิด (Host Rock)

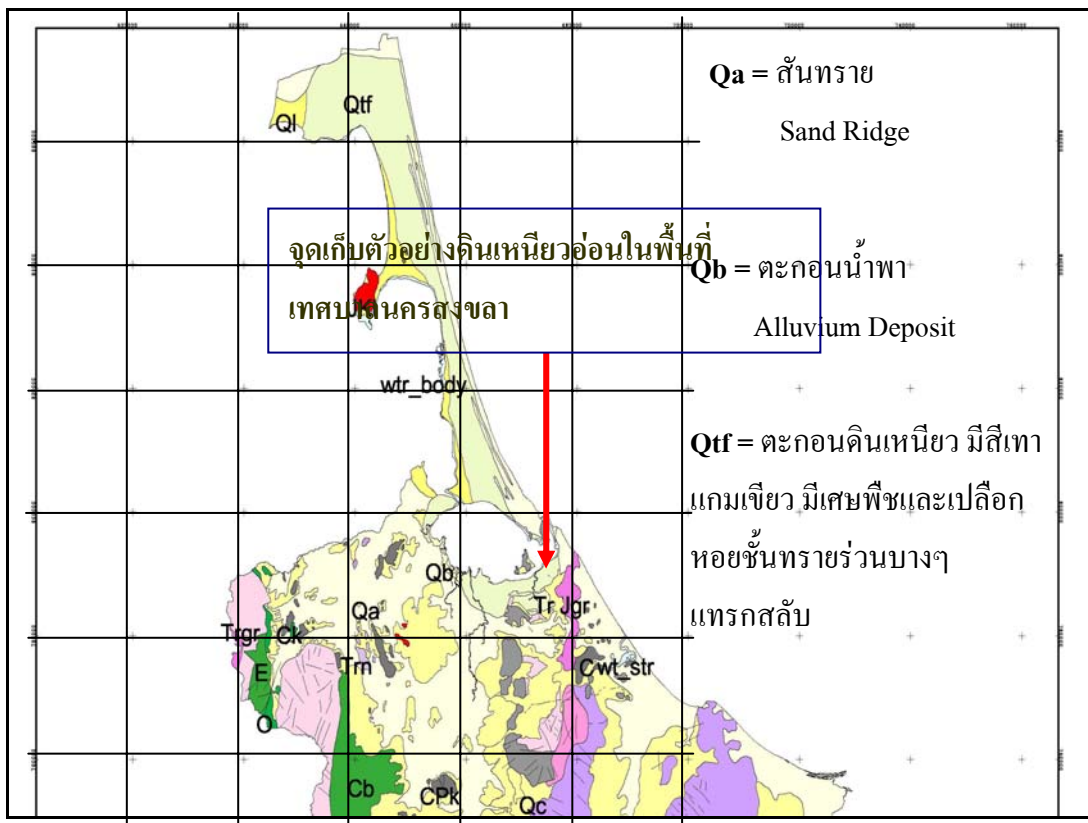
2.3 สภาพชั้นดินบริเวณชายฝั่ง

บริเวณที่ราบชายฝั่งด้านตะวันออก ตั้งแต่จังหวัดสุราษฎร์ธานีลงไปถึงจังหวัดนราธิวาส ชั้นดินบริเวณชายฝั่งส่วนใหญ่จะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน ในบริเวณที่เคยเป็นชายหาดเก่าจะมีชั้นทรายทับถมอยู่ข้างบน ในบางบริเวณ เช่น ที่อำเภอเมืองสงขลาและอำเภอเมืองนราธิวาส ชั้นทรายอาจหนาถึง 12 เมตร หลังสันทรายจะมีร่องน้ำขนานกับแนวชายฝั่ง ดินผิวบนในบริเวณนี้จะเป็นดินอินทรีย์ และในบริเวณจังหวัดนราธิวาส ได้แปรสภาพเป็นดินพรุ (Peat) ปกคลุมผิวบนอยู่หนา 3.0-4.0 เมตร ล่างลงไปเป็นดินเหนียวอ่อน (Marine Clay) สภาพการวางตัวของชั้นดินในบริเวณนี้ได้แสดงในรูปที่ 2.3

ภาคใต้ชายฝั่งตะวันออกในอดีตเป็นส่วนหนึ่งของอ่าวไทย การงอกของชายฝั่งเกิดจากการสะสมของตะกอนที่แม่น้ำพัดพาลงมา ลักษณะเช่นเดียวกันนี้ก็เกิดขึ้นในบริเวณริมฝั่งของแม่น้ำเจ้าพระยา ดังนั้นลักษณะของชายฝั่งจึงไม่แตกต่างกันนักดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นรูปตัดของชั้นดินชายฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยาที่เสนอโดย Cox (1970) ข้อแตกต่างที่เห็นได้อย่างชัดเจน คือ บริเวณปากอ่าวเจ้าพระยาค้นลมค่อนข้างสงบ ดังนั้นจึงไม่มีการก่อตัวเป็นชายหาดเกิดขึ้นและที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งก็คือ ชั้นดินเหนียวแข็งที่อยู่ใต้ชั้นดินเหนียวอ่อน (Marine Clay) มีลักษณะค่อนข้างเหมือนกัน ซึ่งเป็นไปได้ว่าในยุคก่อนควอเทอร์นารี ว่าชั้นดินนี้อาจเป็นชั้นผิวดินที่ปกคลุมบริเวณอ่าวไทยจากภาคกลางถึงภาคใต้ก่อนที่อ่าวไทยจะจมลงได้น้ำ



รูปที่ 2.2 ชั้นดินบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา
ที่มา: Cox (1970)



รูปที่ 2.3 แผนที่ลักษณะทางธรณีวิทยาลุ่มน้ำทะเลสงขลา
ที่มา: ดัดแปลงจากกรมทรัพยากรธรณี (2544)

2.4 สภาพปัญหาทางวิศวกรรม

จากข้อมูลสภาพทางธรณีวิทยาและชั้นดินบริเวณชายฝั่งพบว่า ดินสงขลา มีลักษณะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 20 เมตร ชั้นล่างลงไปเป็นดินเหนียวแข็งปานกลาง 5 เมตร และถัดลงไปเป็นดินเหนียวแข็ง

ทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนสงขลาเป็นดินที่มีกำลังต่ำ (Low Strength) มีสภาพการยุบตัวได้สูง (high Compressibility) ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญทางวิศวกรรม ซึ่งมักก่อให้เกิดปัญหาทางวิศวกรรมอื่นได้แก่

1) ปัญหาด้านการทรุดตัว ซึ่งเป็นผลมาจากการรับแรงแบกทานของดินเหนียว ทำให้ดินเหนียวเกิดการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ส่งผลให้เกิดการทรุดตัวสูงและกินระยะเวลานาน ทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งก่อสร้าง

2) ปัญหาเสถียรภาพความมั่นคงของมวลดิน เช่น งานก่อสร้างถนน งานขุดหรือถมดินเพื่อการก่อสร้าง ซึ่งอาจเกิดการเลื่อนพังได้ เนื่องจากกำลังของดินต่ำไม่สามารถที่จะรับแรงแบกทานและน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นได้

2.5 วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน

United States Airforce (1966) ได้เสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยแบ่งตามขนาดและค่าดัชนีพลาสติก (Plastic Index) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

วิธีการปรับปรุงคุณภาพของดินที่เหมาะสมกับดินเหนียวอ่อน ได้แก่ การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีทางเคมี เนื่องจากสารประสานสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ที่มีอยู่มากในดินได้ดี ซึ่งเมื่อผสมสารเคมีในปริมาณและชนิดที่เหมาะสมกับการปรับปรุงคุณภาพแล้ว ดินเหนียวจะมีสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้นเช่น มีกำลังอัดสูงขึ้น อัตราการทรุดตัวที่ต่ำกว่า สารประสานที่นิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียว ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ของเสี้ยวอุตสาหกรรมเช่น เถ้า กากแร่ เป็นต้น

วิธีการปรับปรุงคุณภาพของดินที่เหมาะสมกับดินเหนียวอ่อน ได้แก่ การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีทางเคมี เนื่องจากสารประสานสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับซิลิกาในดินและอะลูมินาที่มีอยู่มากในดินได้ดี ซึ่งเมื่อผสมสารเคมีในปริมาณและชนิดที่เหมาะสมกับการปรับปรุงคุณภาพแล้ว ดินเหนียวจะมีสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้นเช่น มีกำลังรับแรงเฉือนสูงขึ้น

ตารางที่ 2.1 วิธีปรับปรุงคุณภาพของดินที่ชนิดต่างกัน

ชนิดของดิน	วิธีการปรับปรุงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด
1. ดินเม็ดหยาบ	การผสมด้วยเครื่องจักรกล ดิน-ยางมะตอย ดิน-ซีเมนต์ ปูนขาว-เถ้าลอย
2. ดินเม็ดละเอียด	การผสมด้วยเครื่องจักรกล การปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดิน-ยางมะตอย ปูนขาว-เถ้าลอย คลอไรด์
3. ดินเหนียวมีค่าพลาสติกต่ำ	การบดอัด การปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตัวกั้นน้ำทางเคมี ปูนขาวดัดแปลง
4. ดินเหนียวมีค่าพลาสติกสูง	การปรับปรุงด้วยปูนขาว

ที่มา: United States Airforce (1966)

อัตราการทรุดตัวที่ต่ำลง สารประสานที่นิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียว ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ของเสียจากการอุตสาหกรรมเช่น เถ้า กากแร่ เป็นต้น

การปรับปรุงคุณภาพของดินโดยวิธีทางเคมี ซึ่งมีสารเคมีที่ใช้เป็นสารผสมเพิ่ม ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายดังต่อไปนี้

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement)

ปฏิกิริยาประสานที่สำคัญของปูนซีเมนต์ คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Cement Hydration) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำและเกิดเป็นสารเชื่อมประสาน เรียกว่า ซีเมนต์เหลว (Cement Gel) ซึ่งจะจับตัวแข็งเมื่อมีอายุ

เพิ่มขึ้นและปูนซีเมนต์แต่ละชนิดจะประกอบด้วยสารแคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate) ชนิดต่างๆ ในปริมาณที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีความแตกต่างในสมบัติการแข็งตัวทั้งด้านระยะเวลาและความแข็งแรง

2) ปูนขาว (Lime)

Hausmann (1990) กล่าวว่า ปฏิกิริยาทางเคมีขึ้นพื้นฐานของดินเมื่อถูกปรับปรุงด้วยปูนขาวมี 4 ลักษณะคือ

2.1 ไฮเดรชัน (Hydration)

ปูนขาวชนิดแข็งตัวเร็ว (Quicklime) จะทำปฏิกิริยากับน้ำในดินทันทีเมื่อผสม และทำให้เกิดความร้อนขึ้น ส่งผลให้ปริมาณน้ำในดินลดลง ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาในลักษณะนี้จะมีประโยชน์ต่อการปรับปรุงดินที่มีความชื้นสูง เนื่องจากจะช่วยลดน้ำในดินลง

2.2 การเกาะตัวหรือการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า (Flocculation or Ion Exchange)

เมื่อปูนขาวผสมกับดินเหนียวที่มีความชื้นจะทำให้ดินเหนียวร่วนขึ้น สามารถแยกเป็นเม็ดได้ง่าย เนื่องจากเกิดการแทนที่หรือแลกเปลี่ยนกันของประจุบวก (Cation) ต่างๆ ที่มีอยู่ในดินกับ Ca^{2+} จากปูนขาว โดย Ca^{2+} จะเข้าไปแทนที่ของธาตุโลหะในดินเช่น Na^+ , H^+ ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นที่ผิวของเม็ดดินเหนียว (Clay Particle)

2.3 การประสานหรือการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน (Cementation or Pozzolanic Reaction)

การประสาน (Cementation) หรือปฏิกิริยาปอซโซลาน นั้นเป็นปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวและซิลิกาในดิน (Soil Silica) หรืออะลูมินาในดิน (Soil Alumina) ซึ่งก่อให้เกิดสารที่มีสมบัติการประสานตัวซึ่งกันและกัน โดยเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่ทำให้กำลังของดินเหนียวผสมปูนขาวเพิ่มมากขึ้น

สารที่จะเกิดปฏิกิริยากับปูนขาวแล้วจะได้สารประกอบชนิดใหม่ที่มีสมบัติในการยึดเหนี่ยวเม็ดดินนี้รู้จักกันในชื่อว่า สารปอซโซลาน (Pozzolans) ชนิดและปริมาณของสารปอซโซลานจะเป็นตัวควบคุมปฏิกิริยาดังกล่าว สารปอซโซลานที่พบ ได้แก่ แถ่ลอยและแถ่ภูเขาไฟ เป็นต้น

Ingles (1970) กล่าวว่า สารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต (CAH) จะทำหน้าที่ห่อหุ้มเม็ดดินและประสานเม็ดดินให้เกาะติดกันดังรูปที่ 2.4

สารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต (CAH) ที่เกิดขึ้นจากดินผสมปูนขาวเป็นสารชนิดเดียวกับสารที่เกิดในดินผสมปูนซีเมนต์ แต่ต่างกันว่าสารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต (CAH) ในดินผสมปูนขาวเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างสารแคลเซียม

ออกไซด์ (CaO) กับซิลิกาในดิน (Soil Silica) ส่วนสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ในดินซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยาไฮดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต (CAH) โดยพื้นฐานแล้วจะเกิดขึ้นทันที โดยจะเกิดที่รอยต่อระหว่างขอบและผิวหน้าของดินเดิม สำหรับสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) จะเกิดปฏิกิริยาที่ช้ากว่า แรงยึดเกาะที่เกิดขึ้นจากสารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต (CAH) จะไม่มีความแข็งแรงเหมือนกับแรงยึดเกาะที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH)

2.4 การเกิดคาร์บอนเนตปูนขาว (Lime Carbonation)

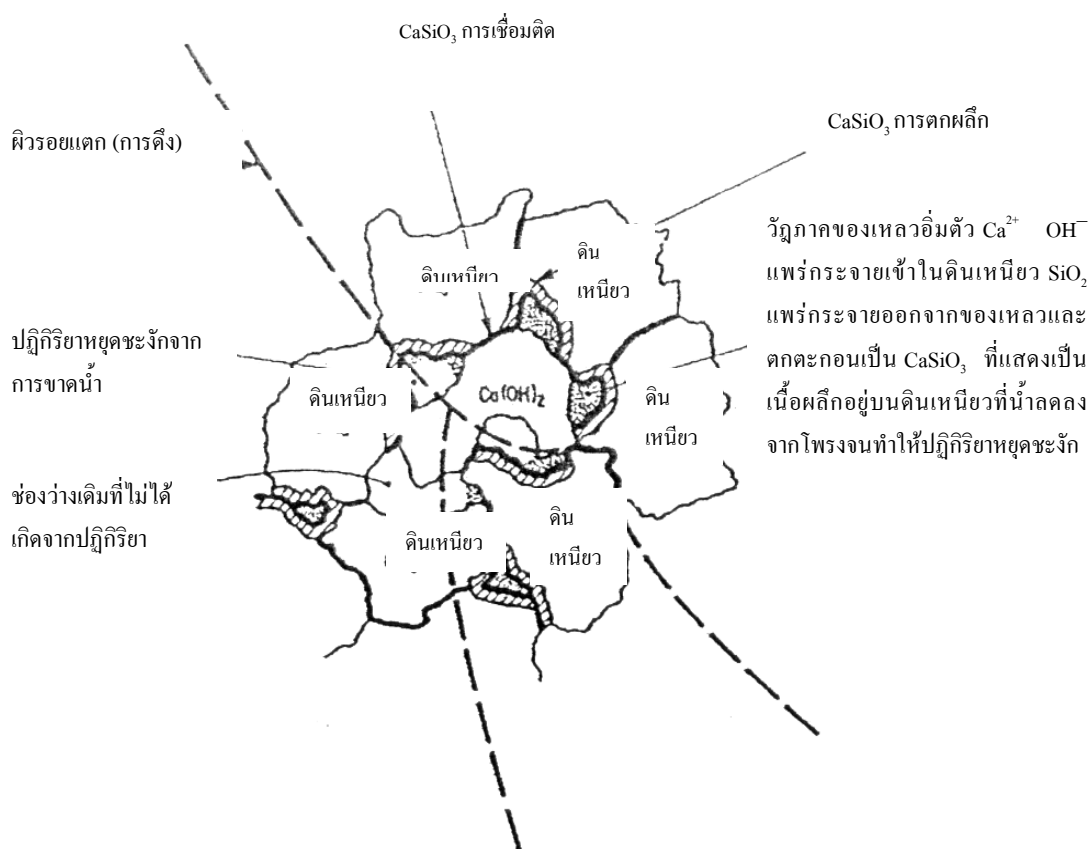
ปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนเนตปูนขาว (Lime Carbonation) เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ในปูนขาวทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศแล้วเกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอนเนต (CaCO_3) กับน้ำ CaCO_3 ที่เกิดขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ลดลง ซึ่งจะทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ให้ช้าลง อันเป็นผลให้การพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวผสมปูนขาวช้าลงกว่าปกติได้ นอกจากนี้ยังพบว่าในตัวอย่างของดินที่ป้องกันไม่ให้ปูนขาวเกิด ปฏิกิริยาคาร์บอนเนต (Carbonation) กับอากาศนั้น เมื่อระยะเวลาในการบ่มนานๆ จะให้กำลังสูงกว่า ตัวอย่างดินที่บ่มแล้วปล่อยให้ปูนขาวทำปฏิกิริยากับอากาศได้ ดังนั้นจึงไม่เป็นที่พึงประสงค์ให้เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนต ขึ้นในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยการผสมปูนขาว โดยต้องเก็บปูนขาวอย่างมิดชิดไม่ให้สัมผัสกับอากาศก่อนการนำไปใช้งาน

3) เถ้า (Ash)

เป็นวัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อน เช่น หินเถ้าภูเขาไฟ (Volcanic Tuff) หินพัมมิชละเอียด (Pumicite) หินดินดาน (Shale) หรือการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ มีสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolans) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวและเกิดเป็นสารเชื่อมประสานได้

4) ยางมะตอย (Bitumen)

เป็นสารที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ ซึ่งมีความหนืดที่ขึ้นกับความเข้มข้นของน้ำยาง การใช้ยางมะตอยในการปรับปรุงคุณภาพของดินจะช่วยป้องกันหรือลดการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน ทั้งนี้เป็นเพราะยางมะตอยมีสมบัติที่บน้ำเมื่อไปเคลือบรอบเม็ดดินก็จะทำให้ความชื้นเข้าไปไม่ได้แต่มีข้อเสีย คือ ยางมีความแข็งแรงต่ำถ้าใช้ในปริมาณมากอาจเกิดเสียด้านกำลังได้



รูปที่ 2.4 การเกาะตัวของสารแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ในโครงสร้างดินเหนียวผสมปูนขาว
ที่มา: คัดแปลงมาจาก Ingles (1970)

5) โมลลาต (Mollas)

เป็นกากของเหลือในรูปของเหลวจากอุตสาหกรรมน้ำตาลหรือโรงกลั่นสุรา ใช้เพิ่มความเหนียวให้กับดินแต่สามารถถูกชะล้างโดยน้ำฝนได้ง่าย

6) ยางไม้ลิกนิน

เป็นกากของเหลือในรูปของเหลวจากโรงงานกระดาษ ใช้เพิ่มความเหนียวให้กับดินแต่อาจก่อให้เกิดปัญหาด้านมลภาวะ

7) โซเดียมคลอไรด์หรือแคลเซียมคลอไรด์

เป็นกากของเหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโซเดียมคาร์บอเนตและฟลูออคาร์บอเนต (ยาสีฟัน) ช่วยในการดูดความชื้นในดิน แต่มีปัญหาเรื่องการกัดกร่อน โครงสร้างถนนคอนกรีต

2.5 ประเภทของดินซีเมนต์

Highway Research Board's Committee on Soil-Portland Cement Stabilization (1959) ได้ให้คำจำกัดความของการพัฒนาดินด้วยซีเมนต์ (Cement-Treated Soil) ว่าเป็นการนำเอาดินและปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ต้องการมาผสมกับน้ำให้เข้ากัน แล้วบดอัดให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด และป้องกันความชื้นไม่ให้สูญเสียไปในระหว่างการบ่ม ดินซีเมนต์สามารถแยกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

1) ดินซีเมนต์ (Soil-Cement) คือ ดินผสมปูนซีเมนต์และน้ำและบดอัดโดยวิธีการกลศาสตร์และทำการบ่มให้แข็งตัว ความแข็งแรงจะพิจารณาจากค่าความคงทน (Durability) และค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์

2) การปรับปรุงดินเม็ดหยาบด้วยการผสมซีเมนต์ (Cement-Modified Granular Soil Mixture) เป็นวัสดุผสมปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพบางอย่างของดินเม็ดหยาบปูนซีเมนต์ที่ใช้ในวัสดุผสมประเภทปรับปรุงดินเม็ดหยาบด้วยซีเมนต์ (Cement Modified Granular Soil) จะใช้เพื่อลดสมบัติทางด้านสภาพพลาสติก (Plasticity) และการบวมตัว (Swell) ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการปรับปรุงวัสดุประเภทดินเม็ดหยาบ (Granular Soil) ในลักษณะดังกล่าวที่มีสมบัติต่ำกว่ามาตรฐานเพื่อใช้ในการพื้นทางหรือรองพื้นทางสำหรับทั้งถนนคอนกรีตและถนนลาดยาง ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้อยู่ที่ประมาณ 1% ของน้ำหนักดินขึ้นไปและปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้นี้มักจะปริมาณน้อยกว่าที่ใช้ในดินซีเมนต์

3) การปรับปรุงทรายแป้งและดินเหนียวด้วยซีเมนต์ (Cement-Modified Silt-Clay Soil) เป็นการใช้ปูนซีเมนต์เพื่อควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน จุดประสงค์ของการทำ การปรับปรุงทรายแป้งและดินเหนียวด้วยซีเมนต์ ก็เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินที่อ่อนผิดปกติ หรือพื้นที่ดินเปียก และการปรับปรุงคุณภาพโดยวิธีการนี้ใช้ปูนซีเมนต์น้อยกว่าดินซีเมนต์

4) ดินมีค่าพลาสติก-ปูนซีเมนต์ เป็นดินที่มีความเหนียวผสมปูนซีเมนต์ที่จะต้องมียาน้ำมากพอที่จะทำให้ส่วนผสมมีสภาพเหลวมากพอที่จะนำไปใช้ในงานลาดปูลง ไปบนพื้นที่ที่มีความลาดเอียงได้ ส่วนมากจะใช้ปูด้านข้างของถนนเพื่อระบายน้ำ ปูด้านข้างของคลองส่งน้ำและปูอ่างเก็บน้ำ ความสามารถในการรับน้ำหนักและความคงทน มีสมบัติคล้ายๆ ดินซีเมนต์

5) การปรับสภาพดินด้วยการผสมและฉีดปูนซีเมนต์ (Cement-Treated Soil Slurries and Grouts) เป็นดินผสมกับปูนซีเมนต์ โดยมีปริมาณน้ำที่สูงและอาจต้องมีสารผสมเพิ่มอื่นๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของส่วนผสมให้มี ความสามารถเทได้ (Workability) สูงพอที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุอัดฉีดน้ำปูน (Grouting Materials) ได้เป็นดินปรับสภาพด้วยซีเมนต์ (Cement-Treated Soil) ประเภทนี้ใช้งานบำรุงรักษาถนนเช่น ทำ Mud jacking กับพื้นถนนที่เกิดการทรุดตัวของคันทางหรือ

รองพื้นทาง ที่ถูกน้ำกัดเซาะหรือปรับปรุงการรับน้ำหนักของหิน โรยรางรถไฟ (Railroad Ballast) ส่วนการอัดฉีด (Grouting) ใช้ในการยาหรืออุดรอยรั่วที่เกิดขึ้นในอุโมงค์ส่งน้ำ

2.6 กลไกการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยปูนซีเมนต์

Lambe et al. (1959) และ Moh (1962) กล่าวว่า เมื่อน้ำผสมกับปูนซีเมนต์ซึ่งมีสารประกอบหลักอยู่ 4 อย่าง คือ C_3S C_2S C_3A และ C_4AF จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Cement Hydration) เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH), แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และปูนขาวไฮเดรตที่คายตัวออกมา (Released Hydrate Lime) กระบวนการดังกล่าวส่งผลทำให้เกิดการแข็งตัวของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสานและนอกจากนี้ปูนขาวไฮเดรตที่คายตัวออกมาก็เกิดขึ้นในกระบวนการดังกล่าวจะทำให้ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของน้ำในโพรง (Pore Water) เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ตะกอนแขวนลอย (Colloid Gel) หรือซีเมนต์เหลว (Cement Gel) ที่ประกอบไปด้วยสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) เกิดการรวมตัวกันแล้วยึดเกาะกันเป็นมวลที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม

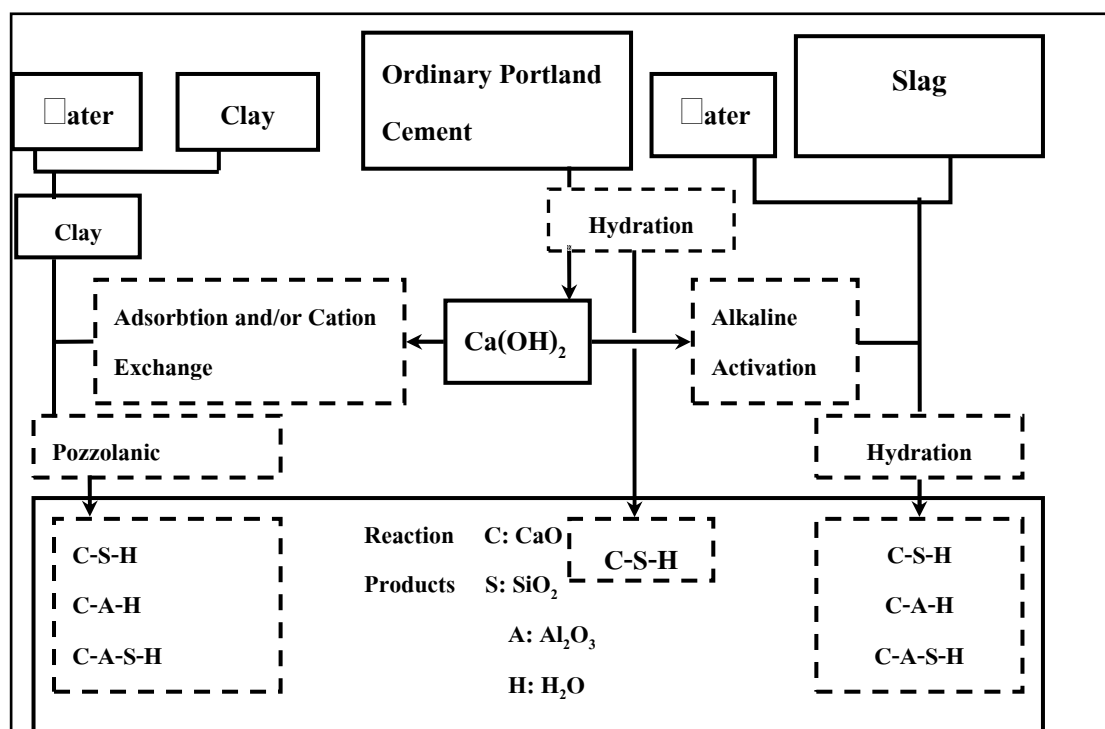
ในมวลดินที่มีขนาดเม็ดละเอียดแรงยึดเกาะจะประกอบด้วย 2 กรณี คือ การยึดจับประสานกันทางกล (Mechanical Interlock) และการจับประสานกันทางเคมี (Chemical Cementation) โดยเฉพาะการยึดเกาะทางด้านการประสานทางเคมีนั้นเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับซิลิกาและอะลูมินาที่มีอยู่ตามผิวของเม็ดดิน โดยมีน้ำเป็นตัวกลางของการเกิดปฏิกิริยา ทำให้เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) โดยจะอยู่รอบ ๆ เม็ดดินทำให้เม็ดดินเกิดการประสานกัน

ในมวลดินที่มีขนาดเม็ดหยาบเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Cement Hydration) การยึดเกาะกันของเม็ดดินกันจะคล้ายกับในคอนกรีต แต่จะต่างกันที่ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) จะไม่ไปอุดในช่องระหว่างอนุภาคของดิน โดยแรงยึดประสานจะเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวทางด้านการยึดจับประสานกันทางกล (Mechanical Interlock) ของอนุภาคดินที่มีแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) เกาะอยู่ที่ผิวอนุภาคดิน โดยซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) จะประสานอนุภาคดินที่อยู่ใกล้เคียงเข้าด้วยกัน ในระหว่างแข็งตัวและจะพัฒนาต่อเนื่องจนแข็งตัวมีโครงสร้างที่แข็งแรง

Herzog and Mitchell (1963) กล่าวว่า การเกิดไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งเป็นกระบวนการช่วงแรก และปฏิกิริยา

ระหว่างซิลิกาและอะลูมินาที่มีอยู่ในเม็ดดินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Ions) ที่เกิดจากปูนขาวไฮดรตที่คายออกมา (Released Hydrated Lime) จะเป็นกระบวนการทุติยภูมิที่ทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต ซึ่งต้องใช้ระยะเวลายาวนานกว่า จึงทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์สูงขึ้นตามอายุของการบ่มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวรู้จักโดยทั่วไปว่าปฏิกิริยาปอชโซลาน

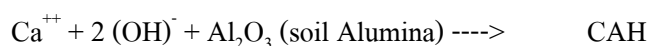
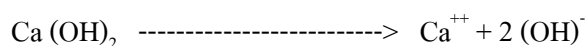
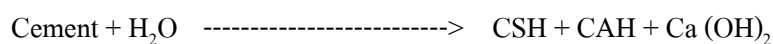
Saitoh et al. (1985) ได้ศึกษาและจำแนกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างดิน ปูนซีเมนต์ และวัสดุปอชโซลาน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 Chemical Reaction between Soil and Hardening Agents

ที่มา: Saitoh et al. (1985)

Moh (1965) ได้เขียนปฏิกิริยาของดินซีเมนต์เป็นสมการทางเคมี ดังต่อไปนี้



- เมื่อ CSH = Calcium Silicate Hydrate (แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต)
 CAH = Calcium Aluminate Hydrate (แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต)
 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ = Calcium Hydroxide ((แคลเซียมไฮดรอกไซด์)

Pendola et al. (1969) สรุปกลไกการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยปูนซีเมนต์ว่าเป็นกระบวนการร่วมกันของปฏิกิริยาทางฟิสิกส์เคมี (Physical-Chemical) ระหว่างปูนซีเมนต์ น้ำ และดิน ซึ่งประกอบด้วย 4 กลไก คือ

1) การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Hydration of Cement) เป็นกระบวนการสำคัญที่สุด โดยจะเกิดขึ้นขณะที่ปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ก่อให้เกิดการประสานแน่นระหว่างเม็ดดินและก่อรูปร่างเป็น โครงข่ายที่แข็งแรงต่อเนื่องกันมาบ้างน้อยบ้างตามการคละของขนาดของดิน ทำให้เม็ดที่ไม่ถูกปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกัน โครงข่ายดังกล่าวนอกจากจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุแล้วยังแทรกตัวระหว่างช่องว่างทำให้ลดการซึมผ่านและการบวมตัวของมวลดินรวมทั้งเพิ่มความคงทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นรอบๆ อีกด้วย

2) การแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าบวก (Cation Exchange) เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าบวก (Cation) หรือเกิดการรวมตัวกันของประจุไฟฟ้าบวก (Cation) บนผิวของเม็ดดิน ซึ่งเป็นสมบัติที่สังเกตได้จากการลดของค่าดัชนีพลาสติก (Plastic Index) ของดินประเภท มีแรงยึดเกาะ (Choesive Soil) ที่มีความชื้นอยู่ผสมกับปูนซีเมนต์ ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นภายในไม่กี่วัน หลังจากผสมปูนซีเมนต์ซึ่งถือว่าเป็นปฏิกิริยารองจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์

3) ปฏิกิริยาคาร์บอเนต (Carbonation) เป็นกระบวนการเชื่อมแน่นจากที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ ในอากาศกับปูนขาว (Lime) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Cement Hydration) กับซิลิกาหรืออะลูมินาในดินทำให้เกิดสารประกอบแน่นเพิ่มขึ้นจากเดิมและทำให้เกิดการยึดเกาะกันในตัววัสดุที่ถูกปรับปรุงคุณภาพแต่ปฏิกิริยานี้อาศัยเวลานานและมีผลทำให้กำลังของวัสดุเพิ่มขึ้น

4) ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นกระบวนการที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวอิสระ (Free Lime) ที่ถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับซิลิกาหรืออะลูมินาในดินทำให้เกิดสารประสานแน่นเพิ่มขึ้นจากเดิมและทำให้เกิดการยึดเกาะกันในตัววัสดุที่ถูกปรับปรุงคุณภาพแต่ปฏิกิริยานี้ต้องอาศัยเวลานานและมีผลทำให้กำลังของวัสดุเพิ่มขึ้น

2.8 โครงสร้างของดินซีเมนต์

Mitchell and Jack (1966) ได้เสนอเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดิน ภายหลังจากการผสมปูนซีเมนต์ลงไปแล้ว ดังรูปที่ 2.6 แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

- 1) ภายใต้อายุการบ่มระยะสั้น ขั้นตอนนี้เป็นช่วงที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Cement Hydration) ปูนซีเมนต์จะเข้าไปผสมกับอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.6 (ก)
- 2) ภายใต้อายุการบ่มระยะสั้น อนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งจะเกิดซีเมนต์เหลว (Cement Gel) เข้าแทรกซึมตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของดินและปูนขาวที่คายตัวออกมา (Released Lime) เริ่มเกิดปฏิกิริยากับซิลิกาในดิน ที่มีพลัง (Active Soil Silica) และอะลูมินาในดินที่มีพลัง (Active Soil Alumina) ในสารละลาย จะเป็นผลให้เกิดการแยกตัวของปฏิกิริยาของซิลิกาในดินและปฏิกิริยาของอะลูมินาในดินและผลของปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้จะแพร่ตามอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.6 (ข)
- 3) ภายใต้อายุการบ่มระยะยาวอนุภาคของปูนซีเมนต์จะเกิดกระบวนการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์อย่างสมบูรณ์มีผลทำให้ค่ากำลังอัดมีค่าสูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 2.6 (ค)

2.9 สมบัติของดินที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว

สมบัติของดินที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว ทั้งสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพ จะเปลี่ยนแปลงไป คือ สมบัติทางกลจะเพิ่มขึ้นอย่างมากในด้านกำลังและโมดูลัสของการเปลี่ยนรูป (Modulus of Deformation) เมื่อเทียบกับดินก่อนการปรับปรุง ดินที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วจะกลายเป็นวัสดุเปราะ ซึ่งลักษณะของการวิบัติจะวิบัติที่ความเครียดต่ำ (Strain Failure) ส่วนสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนไปคือ ปริมาณความชื้น (Water Content) ของดินที่ได้รับการปรับปรุงจะต่ำลง ในขณะที่ค่าหน่วยน้ำหนักรวม (Total Unit Weight) จะสูงขึ้น สัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านได้ของน้ำในดินที่ได้รับการปรับปรุงจะต่ำลง

จากการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยปูนซีเมนต์ที่ทำเรือในประเทศญี่ปุ่นพบว่า ค่ากำลังเฉือนแบบไม่คายน้ำ (Undrained Shear Strength) จะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มและเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ (Cement Content) ที่เพิ่มขึ้นจากสมบัติทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ของดินที่ได้รับการปรับปรุงสามารถบอกได้ว่าความเค้นครากการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Yield Stress) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ เพิ่มค่าความเค้นครากการอัดตัวคายน้ำ และค่าที่เข้าใกล้ค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) และดัชนีการอัดตัว (Compression Index)

จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อค่าความดันการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Pressure) ต่ำกว่าค่าความเค้นครากการอัดตัวคายน้ำ

จากสมบัติของกำลังเฉือนแบบไม่คายน้ำและการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ที่กล่าวมาแล้วในดินที่ได้รับการปรับปรุงสามารถกล่าวได้ว่าจากปฏิกิริยาการสร้างความแข็งแรงทางเคมี (Chemical Solidification Action) ของดินซีเมนต์และดินที่ได้รับการปรับปรุงจะเกิดความเค้นคราก (Yield Stress) ตามค่าความเค้นสูงสุดที่เคยกดทับในอดีต (Pre-consolidation Pressure) ของดินที่มาทับถมกันตามธรรมชาติ และในสถานะที่ดินเกิดความเครียดเมื่อถูกน้ำหนักกระทำภายใต้ความเค้นครากของดินที่ได้รับการปรับปรุงพฤติกรรมจะเข้าใกล้สถานะการอัดตัวเกินปกติ (Over-consolidation) ของดินที่ทับถมเป็นดินตะกอนตามธรรมชาติ

การทดสอบสมบัติของดินในการก่อสร้างจริง ถึงแม้ว่าผลการทดสอบจะสอดคล้องกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการก็ตาม แต่ผลที่ได้รับจากการทดสอบในภาคสนาม ยังคงมีความไม่แน่นอนอยู่สูง เนื่องจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเก็บตัวอย่างและการทดสอบตัวอย่างขนาดใหญ่

2.10 องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของดินผสมซีเมนต์หรือปูนขาว

สมบัติของดินซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างซึ่งแยกได้ดังต่อไปนี้

2.10.1 สมบัติของดิน

ส่วนประกอบที่มีตามธรรมชาติของดินทั้งทางกายภาพและทางเคมี จะมีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำ ด้วยเหตุนี้จึงมีผลกระทบต่อ การรับแรงและความคงทนของดินซีเมนต์ ส่วนประกอบดังกล่าวนี้รวมทั้งด้านฟิสิกส์และด้านเคมี เป็นต้นว่า ปริมาณส่วนผสมของทราย (Sand) ทรายแป้ง (Silt) ดินเหนียว (Clay) และพวกสารอินทรีย์หรือซัลเฟต (Sulphate) ที่มีอยู่ในดิน

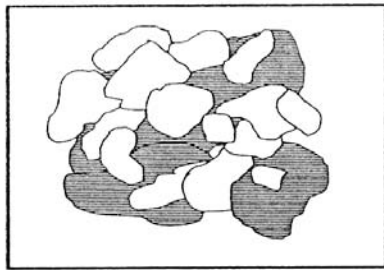
การหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม สามารถใช้ข้อมูลจากปัจจัยต่างๆ ต่อไปนี้

1) การจำแนกชนิดของดิน (Soil Classification Groups) ตามสภาพธรรมชาติของดิน เป็นดัชนีชี้วัดที่บอกถึงปริมาณปูนซีเมนต์ที่จะนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดิน โดยปริมาณของปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับดินแต่ละประเภท โดยจากการจำแนกตามระบบเอกภาพ (Unified



Soil Classification) และ AASHTO ซึ่งปริมาณของปูนซีเมนต์มีค่าโดยประมาณตามที่แสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3

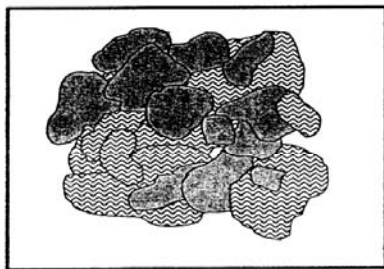
2) ปริมาณมวลรวมที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 จากผลการศึกษาของ Norling and Packard (1958) กล่าวว่า การเพิ่มของปริมาณมวลรวมหยาบที่มีขนาดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 เพิ่มขึ้นจะต้องเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้นด้วย โดยทำให้ความสามารถในการรับแรงแบกทานของดินซีเมนต์สูงขึ้นด้วยเช่นกัน โดยได้ทดลองกับดิน 3 ชนิดคือ ทรายหยาบ (Coarse Sand) ดินร่วนปนทรายละเอียด (Fine Sandy Loam) และทรายปนดินร่วน (Loam Sand) ด้วยปริมาณปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน 3 ตัวอย่าง แต่เมื่อเพิ่มมวลรวมค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 ต่างกัน แล้วนำไปทดลองหาค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน ซึ่งมีผลการทดลองดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าทรายปนดินร่วน (Loam Sand) และดินร่วนปนทรายละเอียด (Fine Sandy Loam) จะมีกำลังอัดที่สูงขึ้นเมื่อมีปริมาณมวลรวมที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 เพิ่มขึ้น ส่วนกรณีของทรายหยาบ (Coarse Sand) จะมีกำลังอัดลดลง เมื่อปริมาณมวลรวมที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 เพิ่มขึ้นมากกว่า 50% ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด

3) ปริมาณดินเหนียว Reinhold (1955) ได้ทดลองนำทรายมาผสมกับดินเหนียว โดยเปลี่ยนปริมาณของดินเหนียวตั้งแต่ 0-100% แล้วนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ที่ปริมาณคงที่ จากนั้นนำไปทดลองหาค่ากำลังอัดและค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ดังรูปที่ 2.8 พบว่าเมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้น ถ้าค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นลดลง แสดงว่ากำลังอัดจะลดลงตามไปด้วย เช่นเดียวกับการทดลองของ Road Research Laboratory (1952) ซึ่งใช้ดินหลายชนิดผสมกับปูนซีเมนต์ประมาณ 10% กำลังของดินซีเมนต์จะลดลงในขณะที่ปริมาณดินเหนียวมากขึ้น





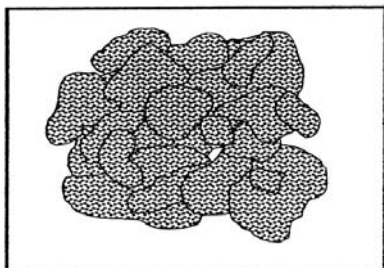
(ก) สถานะช่วงการบดอัด

-  อนุภาคดินเหนียว
-  อนุภาคปูนซีเมนต์ (ไม่ผสมน้ำ)




(ข) สถานะภายใต้การบ่มระยะสั้น

-  อนุภาคดินเหนียวลดลง
-  ผลผลิตปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์เจือผสมน้ำกับดินเหนียวผสมปูนขาว



(ค) สถานะภายใต้การบ่มระยะยาว

-  วัฏภาคดินเหนียวและปูนซีเมนต์ไม่แตกสลาย

รูปที่ 2.6 โครงสร้างของดินซีเมนต์
ที่มา: สมมาตร (2550)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับดินแต่ละประเภทโดยจำแนกตามระบบเอกภาพ

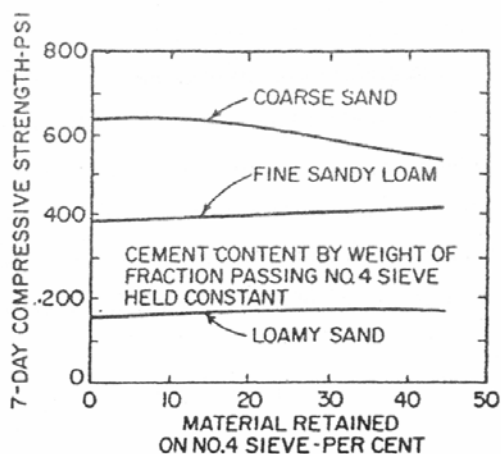
Unified Soil Classification	Typical Range of Cement Requirement (% by wt.)	Typical Cement Content for Moisture Density Test (ASTM D558) (% by wt.)	Typical Cement Content for Durability Tests (ASTM D559 and D 506) (% by wt.)
GW, GP, GM, SW, SP, SM	3 – 5	5	3 – 5 – 7
GM, GP, SM, SP	5 – 8	6	4 – 5 – 6
GM, GC, SM, SC	5 – 9	7	5 – 7 – 9
SP	7 – 11	9	7 – 9 – 11
CL, ML	7 – 12	10	8 – 10 – 12
ML, MH, CH	8 – 13	10	8 – 10 – 12
CL, CH	9 – 15	12	10 – 12 – 14
MH, CH	10 – 16	13	11 – 13 – 15

ที่มา: Anon (1990)

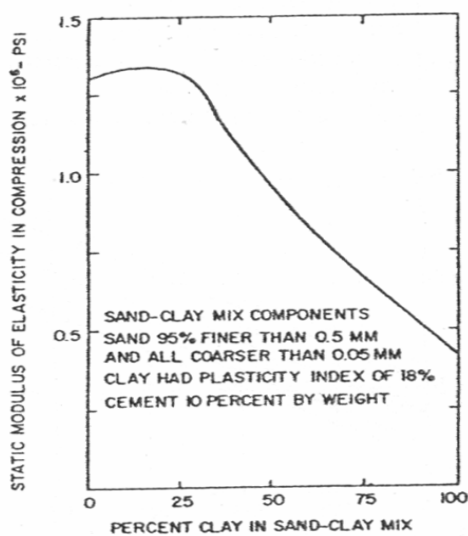
ตารางที่ 2.3 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับดินแต่ละประเภทจำแนกตามระบบ AASHTO

AASHTO Soil Group	Usual Range in Cement Requirement		Estimate Cement Content and That Used in the Moisture Density Test	Cement Content for Wet-Dry and Freeze-Thaw Tests
	(% by wt.)	(% by wt.)	(% by wt.)	(% by wt.)
A-1-a	5 – 7	3 – 5	5	3 – 5 – 7
A-1-b	7 – 9	5 – 8	6	4 – 5 – 6
A-2	7 – 10	5 – 9	7	5 – 7 – 9
A-3	8 – 12	7 – 11	9	7 – 9 – 11
A-4	8 – 12	7 – 11	10	8 – 10 – 12
A-5	8 – 12	8 – 13	10	8 – 10 – 12
A-6	10 – 14	9 – 15	12	10 – 12 – 14
A-7	10 – 14	10 – 16	13	11 – 13 – 15

ที่มา: Portland Cement Association (1959)



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมวลรวมที่ค้างตะแกรงเบอร์ 4 กับค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์
ที่มา: Norling and Packard (1958)



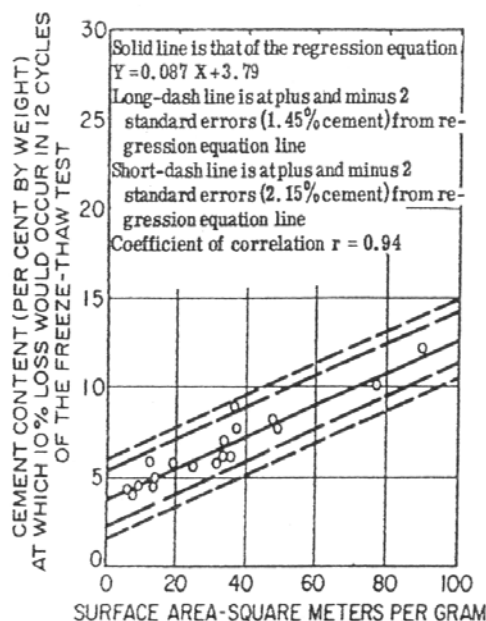
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเหนียวกับค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น
ที่มา: Reinhold (1955)

4) พื้นที่ผิวของเม็ดดิน Diamond and Kinter (1958) ได้ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์กับพื้นที่ผิวของเม็ดดิน วิธีหาพื้นที่ผิวใช้วิธีที่เรียกว่า Glycerol Retention นำตัวอย่างมาทดสอบ Freeze-Thaw Test โดยใช้ตัวอย่าง 18 ตัวอย่าง ดินที่นำมาทดลองมีดินตะกอน (Silt) ผสมอยู่ไม่เกิน 45% ค่า Losses of Weight ที่ทดลองได้ไม่เกิน 10%

จากรูปที่ 2.9 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวกับปริมาณปูนซีเมนต์ จะเห็นว่าเม็ดดินที่มีพื้นที่ผิวมากจะต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้นด้วย พื้นที่ผิวเม็ดดินมีค่าอยู่ระหว่าง 6 ถึง 90 ตารางเมตร/กรัม

5) ค่าพิกัดความเหลว (Liquid Limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic Index) ถึงแม้ค่าทั้งสองของดินจะมีผลต่อสมบัติของดินซีเมนต์ แต่สมบัติอื่นๆ ก็มีอิทธิพลด้วยไม่ใช่ค่าสภาพพลาสติก (Plasticity) เพียงอย่างเดียว การหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมในการทำดินซีเมนต์อาจจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพพลาสติกกับปริมาณปูนซีเมนต์เป็นตัวกำหนดได้ดีพอสมควร

6) สมบัติทางเคมีของดิน Davidson (1961) ได้กล่าวว่า ส่วนประกอบทางเคมีของดินจะทำให้เกิดปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับไฟฟ้าประจุบวก (Cation) ที่มีอยู่ในเม็ดดิน โดยเฉพาะดินที่มีสารอินทรีย์อยู่ด้วยจะทำให้ปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเช่น เกิดการแข็งตัวช้าขึ้น หรือมีการบวมตัวเมื่อมีพวกซัลเฟตผสม ซึ่งจะทำให้กำลังรับแรงลดต่ำลง



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์กับพื้นที่ผิวเม็ดดิน

ที่มา: Diamond and Kinter (1958)

7) ระดับของความละเอียด (Degree of Pulverization) ของดิน Ruenkraitersa (1982) กล่าวว่า Degree of Pulverization ในระดับที่ต้องการปกติของดินซีเมนต์ คือ ควรมีค่าผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ประมาณ 80% การบดอัดปูนซีเมนต์ผสมกับดินโดยที่มีขึ้นอยู่ในส่วนผสมจะไม่มีผลกระทบ

ในด้านกำลังดินซีเมนต์ แต่ถ้าเป็นก้อนดินเหนียวแห้งที่ยังมีการระสมน้ำไม่เพียงพอก่อนการบดอัด เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการบวมตัวขึ้นเมื่อสัมผัสความชื้นและส่งผลให้กำลังลดลง

Ruenkraitergsa (1982) ได้กล่าวว่า การนำความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่นของดินที่บดอัดตามวิธีการของ Proctor มาใช้กับงานดินซีเมนต์ พบว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) นั้นนอกจากจะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) แล้วยังทำให้ปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์อย่างสมบูรณ์ด้วย ผลที่ได้ในการก่อสร้างจริงพบว่าการบดอัดที่ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (γ_d) ไม่ได้แสดงถึงความแข็งแรงและความคงทนของซีเมนต์จะสูงสุด จากการทดลองหาความคงทนด้วยวิธี Freeze-Thaw ของดินตะกอนและดินเหนียว พบว่าความคงทนจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) หรือมากกว่าเล็กน้อย แต่ถ้าค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมต่ำกว่าความคงทนจะลดลง แต่กรณีของดินทรายผสมปูนซีเมนต์ การบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม เล็กน้อยจะทำให้ค่าความคงทนสูงขึ้น ส่วนความแข็งแรงของดินทรายเกิดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมประมาณ 3-6 % แต่ถ้าเป็นดินเหนียวความแข็งแรงจะเกิดขึ้นที่ปริมาณความชื้นเกินค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมไปเล็กน้อย ปริมาณปูนซีเมนต์และประเภทของปูนซีเมนต์ โดยหลักทั่วไปแล้วดินเกือบทุกชนิดจะทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ ปริมาณปูนซีเมนต์ขึ้นอยู่กับประเภทของดินซีเมนต์ สัดส่วนของปูนซีเมนต์ที่ใช้จะเปลี่ยนแปลงตามค่าดัชนีพลาสติก การเปลี่ยนแปลงปริมาตร สมบัติความยืดหยุ่น ความคงทนและชนิดของดินที่จะนำมาปรับปรุงคุณภาพ

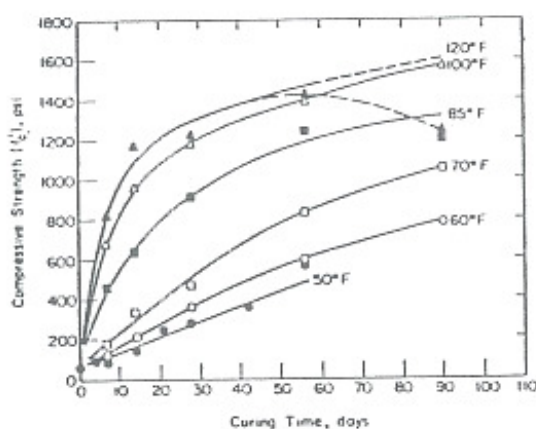
Ruenkraitergsa (1982) ได้อธิบายว่าปริมาณปูนซีเมนต์เป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการปรับปรุงคุณภาพของดิน ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติของดินซีเมนต์ดีขึ้นด้วย อัตราการเพิ่มขึ้นของสมบัติด้านกำลังอัดของดินผสมปูนซีเมนต์ก็ขึ้นกับชนิดของดินที่นำมาปรับปรุงด้วย การเกาะยึดของดินผสมปูนซีเมนต์ที่มีขนาดเม็ดหยาบจะเพิ่มสูงขึ้นและเร็วกว่าดินที่มีขนาดเม็ดละเอียด ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินจะขึ้นอยู่กับชนิดของดินและปริมาณของดินเหนียวที่มีอยู่ในดินเดิมด้วย ดังนั้นจึงควรหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

2.10.2 การบ่มดินผสมปูนซีเมนต์หรือปูนขาว

1) อุณหภูมิ การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิขณะช่วงเวลาที่บ่มตัวอย่างดินซีเมนต์จะเป็นผลทำให้กำลังของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้น

Herzog and Mitchell (1963) ได้ทดลองและพบว่าดินเหนียวที่ผสมปูนซีเมนต์ 30% บ่มที่อุณหภูมิ 50 °C จะมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับดินเหนียวที่ผสมปูนซีเมนต์ 15% บ่มที่อุณหภูมิ 60 °C แสดงให้เห็นว่าอัตราเร่งของกำลังที่เพิ่มขึ้นมีผลกระทบโดยตรงจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

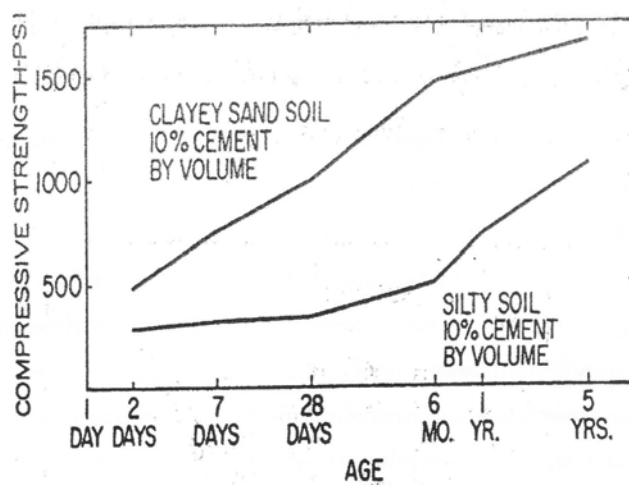
Minnick et al. (1970) ได้กล่าวถึงอายุการบ่มจากการนำปูนขาวและเถ้าลอยมาปรับปรุงดินอ่อน พบว่า การเพิ่มปูนขาวและเถ้าลอยจนมีปริมาณที่เหมาะสมและการเพิ่มอายุการบ่มรวมถึงอุณหภูมิที่เหมาะสม ทำให้ดินมีการพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่องอย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2.10



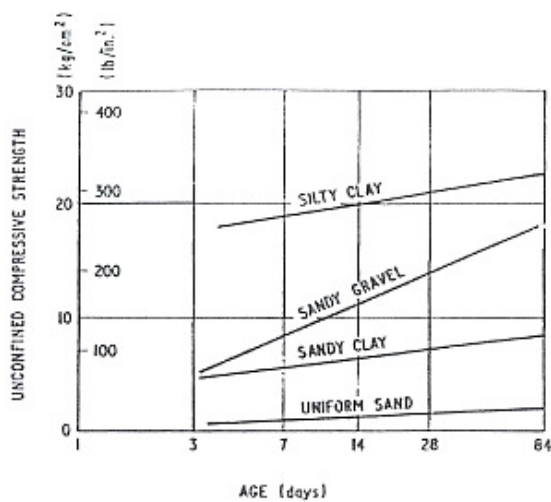
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่ากำลังอัดแกนเดียว

ที่มา: Minnick et al. (1970)

2) อายุการบ่ม Leadabrand (1956) ได้ทดลองนำดิน 2 ชนิด คือ ดินเหนียวปนทรายละเอียด (Clayey Sandy Soil) และดินทรายแป้ง (Silty Soil) มาผสมกับปูนซีเมนต์ 10% ของน้ำหนักดินแห้งแล้วทดสอบหาลำดับแรงอัดที่มีอายุการบ่มตั้งแต่ 2 วันจนถึง 5 ปี โดยทดสอบในห้องปฏิบัติการปรากฏว่าพฤติกรรมของดินซีเมนต์จะคล้ายกับคอนกรีต กล่าวคือกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุของดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.11 และ Ingle and Metcalf. (1972) ได้ศึกษาการปรับปรุงดินด้วยปูนขาว พบว่ากำลังของดินผสมปูนขาวจะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยการพัฒนากำลังของดินผสมปูนขาวในดินแต่ละชนิด จะมีความแตกต่างกันตามชนิดของดินดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับระยะเวลาในการบ่มการทดลองในห้องปฏิบัติการ
ที่มา: Leadabrand (1956)



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับอายุการบ่มของดินแต่ละชนิด
ที่มา: Ingle and Metcalf. (1972)

2.10.3 แร่ผสมเพิ่ม (Mineral Admixture)

Ruenkairergsa (1982) กล่าวว่า การผสมปูนขาวเพียงเล็กน้อยที่เพิ่มเข้าไปในดินที่มีดัชนีพลาสติก (Plastic Index) สูง ก่อนจะผสมปูนซีเมนต์จะช่วยลดค่าดัชนีพลาสติกของดินลงได้มาก และทำให้ดินผสมกับปูนซีเมนต์ได้ง่ายขึ้น

Lambe et al. (1959) กล่าวว่า การใช้สารประกอบจำพวกโซเดียม (Sodium) จะช่วยให้ดินผสมปูนซีเมนต์มีกำลังอัดและความคงทนเพิ่มขึ้นและแก้ลดยเป็นสารผสมเพิ่มที่มีสมบัติเชื่อมประสาน ซึ่งจะทำให้กำลังของดินผสมปูนซีเมนต์มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ลง ทำให้ราคาของดินผสมปูนซีเมนต์ถูกลง

Maclean et al. (1952) ได้ทดลองนำดินที่มีค่าพิคคความเหลว (Liquid Limit) ระหว่าง 70-75 และค่าดัชนีพลาสติก (Plastic Index) ประมาณ 45-53 มาทดลองโดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 15-30% และเพิ่มปูนขาว (Lime) ลงไป 2% พบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นและต้านทานการเสียดน้ำได้ดียิ่งขึ้น แต่ถ้าผสมปูนขาวเกินกว่า 2% ผลที่เกิดอาจเปลี่ยนไป

2.11 สารปอซโซลาน

มาตรฐาน ASTM ให้คำจำกัดความว่า สารปอซโซลาน คือ วัสดุที่มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก

ชัยและไกรวุฒิ (2549) กล่าวว่าโดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลยแต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์ที่ เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน

ในปัจจุบันสารปอซโซลานที่เห็นโดยทั่วไปและใช้กันมาก ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash) ตะกรันเตาถลุงโลหะ ซิลิกาฟูม เถ้าแกลบ เถ้าขานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น

สารปอซโซลานอาจแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มตามลักษณะการนำมาใช้งาน คือ

1. สารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Pozzlanas) โดยทั่วไป คือ วัสดุที่เกิดจากการระเบิดภูเขาไฟเช่น หินเถ้าภูเขาไฟ (Volcanic Tuff) และหินพัมมิช (Pumicite) เป็นต้น
2. สารปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzlanas) ส่วนใหญ่คือ วัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ ดินเหนียว หินดินดาน (Shale) หินซึ่งมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ เถ้าลอยและเถ้าจากการเกษตรกรรม เป็นต้น

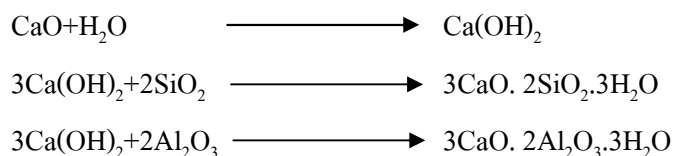
2.11.1 ปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา

อภิสิทธิ์ (2547) กล่าวว่า ปฏิกิริยาเคมีของสารปอซโซลานที่ทำให้เกิดการเชื่อมประสานเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินสามารถแบ่งออกเป็น 3 ปฏิกิริยา ดังนี้

1) ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า (Ion Exchange) เป็นปฏิกิริยาการแทนที่ของแคตไอออนซึ่งมีวาเลนซ์สูงกว่าหรือมีขนาดใหญ่กว่าแคตไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำกว่าหรือมีขนาดเล็กกว่า เช่น Ca^{2+} แทนที่ Na^+ ที่มีอยู่ในดิน ทำให้อนุภาคของเม็ดดินสามารถจับตัวกันดีขึ้นเป็นผลให้ดินมีสภาพดีขึ้น โดยมากมักเกิดจากแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในสารปอชโซลานทำให้มี Ca^{2+} ไปแทนที่ไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำกว่าได้

2) ปฏิกิริยาการจับตัวของเม็ดดิน (Flocculation Agglomeration) เป็นปฏิกิริยาซึ่งทำให้อนุภาคดินเกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยแคตไอออนจากเกลือลอยที่เข้าไปในมวลดินและเข้าไปจับตัวบนผิวอนุภาคของดินเหนียวและเมื่อความเข้มข้นของไอออนสูงขึ้นจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของแร่ดินซึ่งจะทำให้วงน้ำ (Double Layer) หดตัวแคบเข้าทำให้อนุภาคดินเคลื่อนตัวเข้าหากันและเกิดการดึงดูดอนุภาคของเม็ดดินรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน ทำให้โครงสร้างของดินมั่นคงขึ้น

3) ปฏิกิริยาปอชโซลาน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากสารซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของสารปอชโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดการเชื่อมประสานขึ้น เรียกว่า ปฏิกิริยาปอชโซลาน ดังความสัมพันธ์ข้างล่าง



จากความสัมพันธ์ทางเคมีข้างต้นจะทำให้ได้สารประสานที่ดี จะต้องมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ปริมาณหนึ่ง ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ในการเกิดปฏิกิริยาปอชโซลาน

2.11.2 การใช้ของเสียเป็นแร่ผสมเพิ่มในการปรับปรุงวัสดุ

จากตารางที่ 2.4 พบว่าถ้าไม้ยางพาราที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงถึง 58.17% ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชัน เป็นวัสดุปูนซีเมนต์ในตัวเองโดยไม่ต้องใช้ร่วมกับปูนขาวหรือปูนซีเมนต์ (คณพลและจิรัชชาติ, 2543)

เมื่อถ้าไม้ยางพาราที่มีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักสัมผัสกับน้ำจะเกิด ปฏิกิริยาเคมีดังนี้ คือ แคลเซียมออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่ง

สารนี้จะทำปฏิกิริยาต่อไปกับสารซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในเถ้าไยปาล์มน้ำมัน เกิดเป็นสารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งเป็นสมบัติยึดประสาน (Cementitious) เพิ่มขึ้นตามเวลา (ดิษฐพร, 2551)

Weiping and Brown (1997) กล่าวว่า สารประกอบ CSH และ CAH เป็นสารผลิตภัณฑ์หลักเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์

เถ้าแกลบและเถ้าไม้ยังพารามิองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดิน หากมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมจะมีโอกาสพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับงานถนน โดยอาจใช้เป็นวัสดุรองพื้นทาง (Subbase) หรือเป็นวัสดุชั้นพื้นทาง (Base) แม้ว่าสารปอซโซลานส่วนใหญ่จะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นได้ด้วยตัวเอง แต่มักจะผสมปูนขาวหรือปูนซีเมนต์ร่วมกับสารปอซโซลานเพื่อให้ได้กำลังอัดอยู่ในเกณฑ์กำหนด แต่เถ้าแกลบและเถ้าไม้ยังพารามิองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมและมีความเป็นไปได้ที่ไม่ต้องใช้ร่วมกับปูนขาวหรือปูนซีเมนต์

สมชัย (2536) กล่าวว่า ในปี พ.ศ. 2530 มีการนำเถ้าลิกไนต์ไปใช้ในวัสดุชั้นพื้นทางและรองพื้นทางของถนนภายในโรงไฟฟ้าแม่เมาะและเหมืองลิกไนต์ และในปี พ.ศ. 2535 ได้เริ่มนำเถ้าลิกไนต์ผสมน้ำเทเหลวไปใช้กับงานขนาดใหญ่ คือ งานซ่อมแซมการทรุดตัวของระบบระบายน้ำรอบสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ 3 หน้าโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 10-11 มาใช้อยู่บนพื้นฐานที่ว่าเถ้าลิกไนต์แม่เมาะเมื่อนำมาผสมกับน้ำในปริมาณที่พอเหมาะแล้วบ่มทิ้งไว้จะเริ่มแข็งตัวภายในเวลา 1 วัน เนื่องจากมีสมบัติในการแข็งตัวได้ด้วยตนเอง ทั้งนี้เพราะเถ้าลิกไนต์แม่เมาะส่วนใหญ่จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระปนอยู่มากพอที่จะทำปฏิกิริยากับน้ำจนกลายเป็น $(Ca(OH)_2)$ นี้จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่อไปกับซิลิกาและอะลูมินา ซึ่งอยู่ในรูปของแก้วไร้ผลึก (Non-Crystalline Glass) จนเกิดเป็นสารเชื่อมประสานที่แข็งตัวขึ้นได้เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) การนำเอาเถ้าลิกไนต์แม่เมาะไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างงานดินส่วนใหญ่กระทำใน 2 ลักษณะ คือ เถ้าลิกไนต์ผสมน้ำเทเหลวและเถ้าลิกไนต์อัด

2.11.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยังพารา

เชาวนิย์ (2544) ได้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบจากโรงสีข้าวในจังหวัดอยุธยา พบว่ามีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับ 87.80% มีปริมาณ Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับ 0.58% และ 0.79% ตามลำดับ ดังตารางที่ 2.8 (ก)

บริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด (2549) กล่าวว่า องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ มีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับ 93.15 % มี Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับ 0.41 % และ 0.20 % ตามลำดับ ดังตารางที่ 2.8 (ข) ซึ่งมีค่าแตกต่างจากงานศึกษาที่ผ่านมาของ Tay (1990) ที่พบว่ามีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับ 34.3 %, 24.6 % และ 14.9 % ตามลำดับ และยิ่งแตกต่างจากงานศึกษาของ Hussin and Awal (1996) ที่มีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับ 43.6 %, 11.4 % และ 4.7 % ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบแต่ละแห่งมีความเปลี่ยนแปลงทางเคมีสูง ทั้งนี้อาจเนื่องจากชนิดของพันธุ์ข้าว อุณหภูมิและวิธีการที่ใช้ในการเผาแตกต่างกัน เถ้าแกลบที่มีความเหมาะสมมากที่สุดควรมาจากการเผาในระบบปิด (Nair et al., 2006)

สำหรับเถ้าไม้ยางพาราผลการศึกษาศึกษาของคณพลและจิรชาติ (2543) ได้ศึกษามอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าไม้ยางพารา พบว่าเถ้าไม้ยางพารามีปริมาณ CaO เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับ 58.17 % ซึ่งเป็นปริมาณมากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยจับตัวเป็นก้อนแข็งได้โดยไม่ต้องผสมปูนขาว ดังตารางที่ 2.4 (ค)

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ เถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา

องค์ประกอบ (%)	(ก) เถ้าแกลบ	(ข) เถ้าแกลบ	(ค) เถ้าไม้ยางพารา
MgO	0.49	0.45	4.68
Al_2O_3	0.58	0.41	0.25
SiO_2	87.80	93.15	1.61
P_2O_5	-	-	-
SO_3	0.08	-	1.40
K_2O	0.30	2.31	13.68
CaO	1.88	0.41	58.17
Fe_2O_3	0.79	0.20	0.92
Na_2O	2.11	0.08	-
LOI	2.70	2.77	-

หมายเหตุ ก) เชาวนีย์ (2544) ข) บริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด (2549) และค) คณพลและจิรชาติ (2543)

2.11.4 เถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา

ในแต่ละตันของข้าวเปลือกเมื่อนำไปเข้าเครื่องสีแล้วจะมีแกลบเหลือประมาณ 200 กก. และเมื่อนำแกลบไปเผาได้เถ้าแกลบประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักของแกลบหรือประมาณ 40 กก. เถ้าแกลบเมื่อทำให้ละเอียดโดยการนำไปบดละเอียด สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี การบดให้ละเอียดเป็นการเพิ่มความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ได้ดีกว่าเถ้าแกลบดำ ความละเอียดของเถ้าแกลบที่ผ่านการบดแล้วมีพื้นที่ผิวประมาณ 8,000 ถึง 15,000 ซม.²/กก. เมื่อทดสอบโดยวิธีเบลมองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ ซึ่งพบว่าเถ้าแกลบมีซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) สูงมากถึงประมาณร้อยละ 90

อนุภาคของเถ้าแกลบมีความพรุนสูงและมีรูปร่างไม่แน่นอน ทำให้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบมีความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้น ความต้องการน้ำที่มากขึ้นส่งผลต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต คือ คอนกรีตมีกำลังลดต่ำลง จึงจำเป็นต้องทำให้เถ้าแกลบมีความละเอียดขึ้นและใช้สารลดน้ำเข้าช่วยเพื่อให้คอนกรีตยังมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่าเดิมและมีความสามารถในการเทตามต้องการ การก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของซีเมนต์ที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนนานกว่าซีเมนต์เพสต์ปกติ

กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบที่อายุต้นขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าแกลบ เถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงให้กำลังระยะต้นสูงเนื่องจากความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยา กว่าเถ้าแกลบที่มีความละเอียดน้อยกว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบสามารถมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าแกลบได้ โดยเฉพาะกรณีเถ้าแกลบมีความละเอียดสูง ส่วนผสมที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนักให้กำลังอัดค่อนข้างสูง แต่การใช้เถ้าแกลบที่มากเกินไปจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดต่ำลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตไม่ผสมเถ้าแกลบ การผสมเถ้าแกลบยังสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกและกรดไฮโดรคลอริกดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ แต่การหดตัวมากขึ้น (ปริญญาและชัย, 2547)

วัสดุพลอยได้จากโรงงานอบไม้ยางพารา ที่ใช้ไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงในการอบไม้ โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคใต้ตอนล่างมีอุตสาหกรรมการแปรรูปไม้ยางพาราอยู่จำนวนมาก หากนำเถ้าทั้งสองชนิดมาใช้ให้เกิดประโยชน์ย่อมส่งผลในแง่ดีต่ออุตสาหกรรมและสภาพแวดล้อมในภาคใต้

สำหรับเถ้าไม้ยางพาราสอดคล้องกับคุณสมบัติและจรรยาบรรณ (2543) ได้ศึกษามอร์ตาร์ทผสมเถ้าลอยและเถ้าไม้ยางพารา พบว่าเถ้าไม้ยางพารามีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับ 58.17 % ซึ่งเป็นปริมาณมากพอที่จะเกิดที่จะสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยจับตัวเป็นก้อนแข็งได้โดยไม่ต้องผสมปูนขาว ดังแสดงในตารางที่ 2.8 (ค)

2.12 ข้าว

ผลผลิตข้าวโลก ในช่วงปี 2545-46-2549-50 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 562.4 ล้านตันข้าวเปลือก (377.51 ล้านตันข้าวสาร) เป็น 622.1 ล้านตันข้าวเปลือก (417.7 ล้านตันข้าวสาร) หรือเพิ่มขึ้น ในอัตราเฉลี่ยร้อยละ 2.69 โดยในปี 2549-50 มีพื้นที่เก็บเกี่ยว 956 ล้านไร่ ได้ผลผลิต 622.1 ล้านตันข้าวเปลือก (417.65 ล้านตันข้าวสาร) ผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ 651 กิโลกรัม/ไร่ ทั้งพื้นที่และผลผลิตค่อนข้างไม่เปลี่ยนแปลง โดยเพิ่มขึ้นจากปี 2548-49 ที่ผ่านมเล็กน้อยเพียงร้อยละ 0.20 และ 0.03 ตามลำดับ แต่ผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ลดลงจากปีที่ผ่านมาร้อยละ 0.31 แต่ผลผลิตโดยรวมเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 2.9 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผลผลิตประเทศผู้ผลิตรายใหญ่ ได้แก่ จีน อินเดีย เวียดนาม บังคลาเทศ พม่า อียิปต์ ฟิลิปปินส์และไทย (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์)

ปริมาณแกลบที่เหลือจากอุตสาหกรรมการเกษตรทั่วโลกในปี 2549-50 มีอยู่ประมาณ 124.42 ล้านตัน นับว่าเป็นของเสียที่มีจำนวนมาก ในขณะที่ประเทศไทยมีปริมาณแกลบอยู่ประมาณ 5.928 ล้านตัน ซึ่งส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า จากโรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวลแกลบและบางส่วนถูกเผาทิ้งทำลายให้สลายไปโดยเปล่าประโยชน์ ผลจากการเผาแกลบในประเทศไทยทำให้มีของเหลือที่เรียกว่า แกลบประมาณ 1.186 ล้านตัน จึงมีปริมาณมากเพียงพอที่จะนำมาพัฒนาใช้ให้เกิดประโยชน์ด้านการแทนที่ปูนซีเมนต์ดังรูปที่ 2.13 ก)

ตารางที่ 2.5 พื้นที่เพาะปลูกและผลผลิตของข้าวนาปีและนาปรังของประเทศไทย ปี 2547-2551

รายการ	ปี 2547 (2546/2548)	ปี 2548 (2547/2548)	ปี 2549 (2548/2549)	ปี 2550 (2549/2550)	ปี 2551* (2550/2551)
ข้าวนาปี					
พื้นที่ปลูก (ล้านไร่)	56.972	57.652	57.774	57.542	57.422
ผลผลิต (ล้านตัน)	23.142	22.650	23.539	22.840	23.387
ข้าวนาปรัง					
พื้นที่ปลูก (ล้านไร่)	9.432	8.914	9.903	10.074	9.529
ผลผลิต (ล้านตัน)	6.332	5.888	6.753	6.802	6.515

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2551)

2.13 ไม้ยางพารา

ผลผลิตยางพาราของไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากราคาที่อยู่ในระดับสูง จูงใจให้เกษตรกรดูแล บำรุงรักษาและมีการกรีดยางดีขึ้น รวมทั้งเปิดกรีดต้นยางใหม่ก่อนอายุและจากการที่ราคาขายอยู่ในระดับสูงจึงจูงใจให้มีการขยายพื้นที่ปลูกใหม่มากขึ้น ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา ไทยมีเนื้อที่ปลูกเพิ่มขึ้นในอัตราเฉลี่ยร้อยละ 4.23 ต่อปี จาก 12.619 ล้านไร่ ในปี 2546 เป็น 14.792 ล้านไร่ ในปี 2550 สำหรับปี 2550 เนื้อที่ปลูกยางพาราเพิ่มขึ้นจากปี 2549 ในอัตราร้อยละ 3.17 แรงจูงใจที่เกิดจากราคาที่สูงขึ้น เนื่องจากความต้องการใช้ยางพาราของประเทศจีน อินเดียและรัสเซีย (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์) ทำให้ประเทศไทยต้องมีการเพิ่มเนื้อที่ปลูกมากขึ้นดังตารางที่ 2.10

การเพิ่มพื้นที่ปลูกของยางพาราทำให้มีไม้ยางพาราเพิ่มมากขึ้น ไม้ยางพาราถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบทำเฟอร์นิเจอร์ เป็นผลให้เหลือเศษไม้ยางพาราเป็นจำนวนมากและก็ถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของการอบไม้ยางพาราและปัจจุบันยังนำไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า อย่างเช่น โรงไฟฟ้าชีวมวลที่จังหวัดยะลา ที่ใช้เศษไม้ยางพาราหรือที่เรียกว่า ปีกไม้ยางและ ไม้ยางท่อนขนาดเล็ก ประมาณ 650 ตัน/วัน หรือคิดเป็น 238,000 ตันต่อปี โดยทำการเผาไหม้ในหม้อไอน้ำชีวมวล (Great Boiler) ซึ่งจะป้อนพลังงานไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้มีเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้เป็นจำนวนมากประมาณ 22 ตันต่อวัน โดยแบ่งเป็นเถ้าลอยมากถึง 20 ตัน และเถ้าหนักประมาณ 2 ตันดังรูปที่ 2.13 ข) ซึ่งเป็นปัญหาด้านสภาพแวดล้อมบริเวณรอบและบริเวณใกล้เคียงโรงงาน

ตารางที่ 2.6 พื้นที่ปลูกยางพาราของประเทศไทย

ปี	พื้นที่ปลูก (ล้านไร่)
2546	12.619
2547	13.021
2548	13.420
2549	14.338
2550	14.792

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2551)



ก)



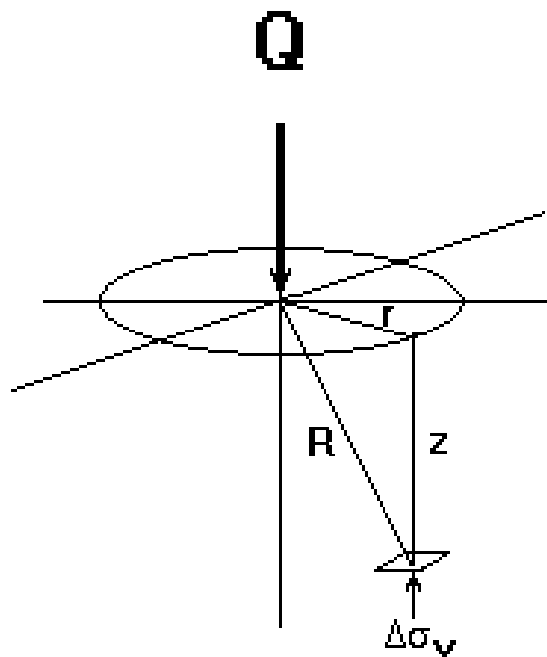
ข)

รูปที่ 2.13 วัสดุทั้ง 2 ชนิดที่นำมาใช้ในการศึกษา ก) วัสดุแกลบและ ข) วัสดุไม้ยางพารา

2.14 การกระจายความเค้นในดิน

การกระจายของหน่วยแรงโดยน้ำหนักบรรทุกที่กระทำเป็นจุด (Stress caused by a point load) โดยทฤษฎีของ Boussinesq (คศ. 1883) ได้การศึกษาเพื่อแก้ปัญหของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นกับมวลดินโดยน้ำหนักที่กระทำเป็นจุดดังรูปที่ 2.14 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง r/z ดังตารางที่ 2.7 สามารถหาหน่วยแรงดังกล่าวได้ตามสมการที่ 2.1 โดยมีสมมติฐานว่า

- 1) มวลดินเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)
- 2) ลักษณะยืดหยุ่น (Elastic)
- 3) เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเนื้อดินเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic)



รูปที่ 2.14 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักที่กระทำเป็นจุดตามทฤษฎีของ Boussinesq

$$\Delta\sigma_v = \frac{3Q}{2\pi} \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{5/2}} = \frac{Q}{z^2} \cdot \frac{3}{2\pi \left[1 + \left(\frac{r}{z} \right)^2 \right]^{5/2}} = \frac{Q}{z^2} \cdot I_B \quad 2.1$$

ตารางที่ 2.7 แสดงค่าของ I_B ในรูปความสัมพันธ์ของ (r/z)

r/z	I_B	r/z	I_B	r/z	I_B	r/z	I_B
0	0.7775	0.26	0.4050	0.70	0.1762	2.40	0.0040
0.02	0.4770	0.28	0.3954	0.75	0.1565	2.60	0.0029
0.04	0.4765	0.30	0.3849	0.80	0.1386	2.80	0.0021
0.06	0.4723	0.32	0.3742	0.85	0.1226	3.00	0.0015
0.08	0.4699	0.34	0.3642	0.90	0.1083	3.20	0.0011
0.10	0.4657	0.36	0.3521	0.95	0.0956	3.40	0.0008
0.12	0.4607	0.38	0.3408	1.00	0.0844	3.60	0.0006
0.14	0.4548	0.40	0.3294	1.20	0.0513	3.80	0.0005
0.16	0.4482	0.45	0.3011	1.40	0.0317	4.00	0.0004
0.18	0.4409	0.50	0.2733	1.60	0.0200	4.20	0.0003
0.20	0.4329	0.55	0.2466	1.80	0.0129	4.40	0.0003
0.22	0.4242	0.60	0.2214	2.00	0.0085	4.60	0.0002
0.24	0.4151	0.65	0.1978	2.20	0.0058	4.80	0.0002

ที่มา: สันชัยและพานิช (2547)

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีการปรับปรุงดินเหนียวอ่อนโดยการใช้สารเคมีผสมเพิ่มเพื่อเพิ่มกำลังและความมีเสถียรภาพของดินเดิมในพื้นที่ดำเนินการก่อสร้างถนน เพื่อลดปัญหาการทรุดตัวของดิน ซึ่งเป็นปัญหาทางวิศวกรรม ซึ่งมักจะเป็นการปรับปรุงโดยการใช้ปูนซีเมนต์มาเป็นส่วนผสมวิธีการนี้ได้ถูกพัฒนาโดยประมาณตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 เป็นต้นมาทั้งประเทศสวีเดนและญี่ปุ่น ปูนซีเมนต์ได้ถูกนำมาใช้ในงานถนนด้วยเพื่อเพิ่มการรับแรงแบกทานของดิน (Soil Bearing Capacity) ในชั้นคันทาง (Subgrade) หรือเพิ่มลดความหนาของชั้นพื้นทาง (Base Course) ต่อมาได้มีการใช้งานมากขึ้นสำหรับงานต่างๆ และได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

วิจิตต์อัจฉราและคณะ (2536) กล่าวว่า เถ้าบางชนิดสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน เนื่องจากเถ้ามีส่วนผสมของซิลิกา และอะลูมินาสูง ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับปูนขาวเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งทำให้เม็ดของเถ้าเกิดการเกาะรวมตัวกัน ปฏิกิริยานี้คล้ายกับไฮเดรชันของปูนซีเมนต์

คณูพลและจิราชาติ (2543) ได้ศึกษาเถ้าไม้ยางพาราผสมในปูนซีเมนต์ พบว่าเถ้าดังกล่าวมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงถึง 58.17% ไม่ส่งผลต่อค่าดัชนีกำลังมอร์ต้าสูงสุด แต่หากนำเถ้าลอยและเถ้าไม้ยางพาราผสมด้วยกันแทนที่ในปูนซีเมนต์ พบว่าให้ค่ากำลังอัดมอร์ต้าเพิ่มขึ้น (คณูพลและคณะ, 2546)

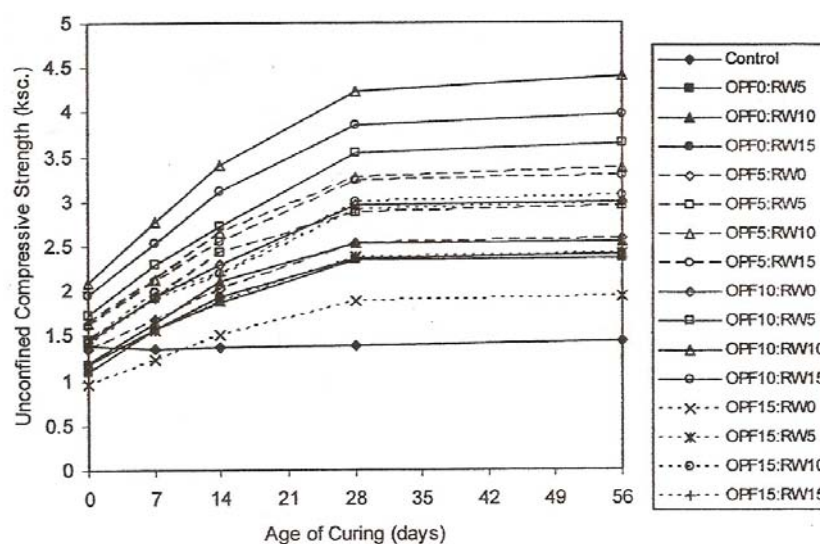
ศุภกิจและกมล (2545) ได้ดำเนินการศึกษาถึงผลของการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน โดยการใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาว ดินเหนียวอ่อนที่ใช้ในการดำเนินการทดสอบเป็นดินอ่อนที่มีค่าพลาสติกสูง (CH) มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 93.5% มีค่าความเป็นพลาสติก 60.2% ค่ากำลังอัดเท่ากับ 0.08-0.21 กก./ซม.² โดยการนำดินเหนียวอ่อนมาผสมปูนซีเมนต์และปูนขาว ที่ปริมาณ 100 150 200 และ 250 กก./ซม.² ซึ่งใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัตถุประสานเท่ากับ 0.8 โดยดำเนินการทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยว ที่อายุการบ่ม 4 7 14 28 90 และ 180 วัน ผลการทดสอบพบว่าดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์มีการพัฒนากำลังอัดอย่างรวดเร็วในระยะแรกตั้งแต่ผสมจนถึงอายุ 28 วัน และหลังจากนั้นกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในระยะยาว และเมื่อเพิ่มปริมาณของปูนซีเมนต์ส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นด้วย ผลจากการทดสอบการทรุดตัวพบว่า เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติทางวิศวกรรม เช่น ค่า C_v , k , C_r และ C_c ลดลงในขณะที่ค่า P'_c เพิ่มขึ้น

เชาวนีย์ (2544) ดำเนินการศึกษาวิจัยโดยการนำปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบมาใช้ในการปรับปรุงดิน ซึ่งในการเตรียมตัวอย่างโดยการนำตัวอย่างมาบ่มตามระยะเวลา 3 7 14 และ 28 วัน แล้วดำเนินการทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยว พบว่าซีเมนต์และเถ้าแกลบทั้ง 2 ชนิด จะช่วยให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนดีขึ้น โดยกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการผสมและระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มมากขึ้น สำหรับการทดสอบอัดตัวคาน้ำ พบว่าการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แสดงให้เห็นจากการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การยุบตัวของดิน (C_v) และค่าดัชนีการอัดตัว (C_c) และค่าความเค้นที่แตกกดทับดินในอดีตเพิ่มขึ้นแต่การปรับปรุงดินเหนียวอ่อนด้วยการผสมเถ้าแกลบเพียงอย่างเดียว จะมีผลต่อกำลังของดินเพียงเล็กน้อยเนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีในรูปของซิลิกา จึงไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับดินเหนียวอ่อนได้สมบูรณ์

สมมาตร (2550) ได้ปรับสภาพดินป่าพรุในจังหวัดสงขลาและสตูล ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง จนสามารถนำดินมาใช้เป็นวัสดุกันทางได้ ผลการศึกษากรณีดินในจังหวัดสงขลา ดินดังกล่าวมีค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 2.29-2.63 มีค่าพิกัดความเหลวระหว่าง 73.80-93.00

ดัชนีพลาสติกมีค่าระหว่าง 32.85-46.67 กำลังอัดแกนเดียวมีค่าระหว่าง 0.10-0.37 กก./ซม.² ซึ่งเป็นค่าของสภาพดินเดิมและเมื่อปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ดินมีการพัฒนาคุณภาพดีขึ้นตามปริมาณของซีเมนต์และอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น แต่การพัฒนาคุณภาพได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนของความเค็มจากน้ำทะเล

ดิษฐพร (2551) ได้ปรับปรุงดินเหนียวปากพางด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา ผลการทดสอบ หลังจากผสมดินเหนียวปากพางด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา อย่างละร้อยละ 10 พบว่า ค่าดัชนีพลาสติก ความหนาแน่นแห้งและสัมประสิทธิ์การอัดตัวซาลดลงเป็น 33.93% 3.88% 017% และกำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังรับแรงแบกทานเพิ่มขึ้นถึง 207% 1425% และ 110-770% ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.15 และมีการตรวจพบสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งตัวบ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่ากำลังอัดทุกอัตราส่วน

ที่มา: ดิษฐพร (2551)

คุณพลและคณะ (2551) กล่าวว่า การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังอัดเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของซิลิกาในเถ้าลอยกับแคลเซียมออกไซด์ที่อยู่ในปูนซีเมนต์ที่เกิดหลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน

Basha et al. (2005) ศึกษาการปรับปรุงดินเดิมด้วยเถ้าแกลบและปูนซีเมนต์ ได้กล่าวว่า การเพิ่มความมั่นคงของดินเดิม โดยใช้วิธีทางเคมีเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของดินเดิมวิธีหนึ่ง ซึ่งในการศึกษาโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ โดยการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และวิศวกรรมของดินเดิมหลังปรับปรุง โดยการทดสอบการบดอัดและค่ากำลังอัด ส่งตรวจ XRD พบว่า

การผสมปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบมีผลกระทบต่อค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นเหมาะสม มีผลกระทบกับค่าดัชนีพลาสติกและยังส่งผลให้ค่าอัตราส่วนกำลังแบกทานแบบแคลิฟอร์เนียเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม คือ ปูนซีเมนต์ 4-8% และเถ้าแกลบ 10-15% เพราะประหยัดค่าใช้จ่ายแต่อัตราส่วนผสมที่ให้กำลังสูงสุดคือ ปูนซีเมนต์ 12% และเถ้าแกลบ 20% ถ้าผสมเถ้าแกลบมากกว่า 20% กำลังของดินตัวอย่างมีค่าต่ำลง

Yang et al. (2006) ได้ศึกษาการปรับปรุงดินที่ปนเปื้อนสารตะกั่วด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งและเถ้าแกลบ ซึ่งจากศึกษาพบว่าผลกระทบต่อกำลังของดินจากสารตะกั่วขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของสารในดินที่ผสมอยู่ในดินตัวอย่าง ส่วนสมบัติทางด้านวิศวกรรมและกายภาพหลังจากการปรับปรุงได้ดำเนินการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว โดยบ่มตัวอย่างที่ระยะเวลา 1 3 7 14 28 และ 56 วัน ในแต่ละอัตราส่วนผสม ผลพบว่าการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งและเถ้าแกลบส่งผลให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มที่เพิ่มมากขึ้นและยังพบว่ามีอาการเกิดผลึกในดินตัวอย่างเพราะมีปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้น

Circeo et al. (1962) กล่าวว่า การใส่ปูนซีเมนต์ลงในดินจะเปลี่ยนแปลงสมบัติและโครงสร้างของดิน ดินเกือบทุกชนิดสามารถปรับปรุงคุณภาพได้ แต่จะให้ผลที่แตกต่างกันถึงแม้ว่าดินจะมีสมบัติทางฟิสิกส์ที่เหมือนกัน ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากัน แต่หากดินมีสมบัติทางเคมีแตกต่างกัน ทำให้เกิดผลกระทบต่อกำลังอัดของดินที่ไม่เหมือนกันด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าส่วนประกอบทางเคมีจะมีผลอย่างไรต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์

Mitchell (1982) กล่าวว่า วัตถุประสงค์ในการนำสารเคมีผสมลงในดินก็เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินได้แก่ ควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตร การปรับปรุงคุณภาพในการรับน้ำหนักหรือพฤติกรรมของความเค้นและความเครียด ปรับปรุงการไหลซึมของน้ำที่ผ่านดินและความทนทานต่อการกัดกร่อนแตกหักของหิน การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินได้แก่ การบวมตัว หรือหดตัวของดิน เมื่อความชื้นในดินมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากสภาพของภูมิอากาศ มีผลต่อกำลังรับแรงแบกทานของดิน การควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินสามารถทำได้โดยการผสมสารที่มีปฏิกิริยาไฟฟ้าบวกต่างๆ เช่น แคลเซียม แมกนีเซียมและอะลูมิเนียม เข้าไปแทนที่ดินที่มีสารประกอบประเภทโซเดียมหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาที่จะทำให้การประสานเม็ดดินเกิดขึ้น รวมทั้งอาจทำได้โดยการใส่สารเคมีช่วยป้องกันการซึมของน้ำ

การที่จะทำให้ความสามารถในการรับแรงแบกทานของดินเพิ่มขึ้นหรือทำให้ดินแข็งแรงขึ้นก็อาจทำได้โดยการลดช่องว่างในเม็ดดิน การทำให้เม็ดดินเชื่อมติดกันหรือการทำให้เกิดการเกาะตัว (Flocculation) รวมทั้งการป้องกันไม่ให้เกิดการบวมตัวของดินล้วนมีส่วนช่วยให้ดินมีกำลังแข็งแรงขึ้น การลดการซึมได้ของดินก็ทำได้โดยการลดช่องว่างในเม็ดดิน หรือการทำให้ขนาด

มวลคละของดินคืบขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการปรับปรุงคุณภาพของดินระหว่างสสารอินทรีย์ (Organic Matter) โดยทั่วไปจะแตกต่างกันมาก โดยที่สสารอินทรีย์จะให้กำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและจะหยุดการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงแบกทานเมื่อระยะเวลาหนึ่ง

เมื่อผสมปูนซีเมนต์ลงไปดินจะเกิดปฏิกิริยาและได้สารสุดท้าย แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ซึ่งในปูนซีเมนต์จะมี SiO_2 อยู่แล้ว ปฏิกิริยาช่วงสั้นๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อผสมปูนซีเมนต์ลงในดินประกอบด้วย การแทนที่โดยวิธีการดูดซับประจุไฟฟ้าบวก (Cation) ของแคลเซียม (Calcium) และเม็ดดินจะดูดซับเอาแคลเซียมออกไซด์ (Ca(OH)_2) เข้าไว้ เกิดสารประกอบที่ทำให้เกิดการยึดประสานติดกันของเม็ดดิน และเกิดการเพิ่มสภาพความเป็นด่างขึ้นให้กับสภาวะแวดล้อม ส่วนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องในระยะยาวนั้น เนื่องจากสภาพความเป็นด่างจะทำให้เกิดการแยกตัวของเม็ดดินเหนียว และการผลิตสารประกอบที่ช่วยในการยึดประสานเพิ่มขึ้นต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานหลายปี

Gordon (1984) กล่าวว่า การผสมสารเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพของวัสดุงานทางมีการใช้สารหลายชนิดในการผสม ดังนั้นทางเลือกในการใช้สารผสมเพิ่ม จึงต้องพิจารณาถึงสมบัติตามธรรมชาติของวัสดุที่จะทำการปรับปรุง วัตถุประสงค์ หรือเป้าหมายของการปรับปรุงสมบัติที่ต้องการของวัสดุหลังจากการปรับปรุง ความสามารถของเครื่องมือที่ใช้และราคาที่ประหยัดอย่างเหมาะสมที่สุดและยังได้รายงานไว้ในควีนแลนด์ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มจะดีที่สุด แต่ในบางครั้งยังใช้ปูนขาวเป็นสารผสมร่วมเพื่อให้เกิดการปรับปรุงเบื้องต้น สำหรับดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูงเป็นพิเศษด้วยในออสเตรเลีย โดยทั่วไปใช้ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ปูนขาว-เถ้าลอยและปูนขาว-ปูนซีเมนต์-ยางมะตอย

Metcalf (1977) ได้เสนอการเลือกวิธีปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยวิธีต่างๆ เช่น การใช้ปูนขาว ซีเมนต์ ยางมะตอย เครื่องจักรกลและอุณหภูมิดังตารางที่ 2.8 ซึ่งวิธีการที่ต้องเลือกให้เหมาะสมที่สุดในแต่ละชนิดของดิน โดยคำนึงถึงอิทธิพลของขนาดเม็ดดินเป็นหลัก

Billmot (1995) กล่าวว่า การปรับปรุง ณ ที่เดิม (In Situ Stabilization) ได้ใช้กับงานสร้างทางและการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycling) ในประเทศออสเตรเลีย ตั้งแต่ปี 1950 ซึ่งใช้สารผสมเพิ่ม คือ ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์-เถ้าลอย ยางมะตอยและปูนขาวไฮดรชัน โดยที่นำวัสดุผิวทางเก่ามาทำใหม่ (Pavement Recycling) ต่อมาในปี 1980 ก็มีการนำปูนซีเมนต์ผสมมาใช้กันอย่างกว้างขวาง เพราะเพิ่มระยะเวลาในการทำงานให้ยาวนานขึ้น โดยให้ความแข็งแรงเท่ากันในระยะยาว ปูนซีเมนต์ผสมดังกล่าว ได้แก่ ปูนซีเมนต์-เถ้าจากเตาน้ำมัน ปูนซีเมนต์-เถ้าลอยและปูนซีเมนต์-ปูนขาว ซึ่งใช้กันอย่างกว้างขวางในรัฐ New South Wales, South Australia และ Queensland ซึ่งได้มีการเสนอแนวทางเลือกใช้สารผสมเพิ่ม ดังตารางที่ 2.19

Ruenkraitergsa (1982) กล่าวว่า ปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับดิน อาจทำให้ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นได้ไม่เต็มที่ถ้ามีสารประกอบอื่นๆ อยู่ในดินด้วย เช่น ปริมาณสารอินทรีย์และซัลเฟต โดยจะทำให้ความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวลดลง โดยจะแบ่ง Ca^{2+} มาจากปฏิกิริยา ปอชโซลาน ทำให้อัตราการเพิ่มความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวลดลง สารประกอบของเหล็ก เช่น Fe_2O_3 ที่เคลือบอยู่ในโครงสร้างของดินก็สามารถหน่วงการเกิดปฏิกิริยาให้ช้าลงได้เช่นกัน

Terrel et al. (1979) กล่าวว่า ดินที่มีค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity Index) ตั้งแต่ระดับต่ำถึงปานกลางจะสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมในการปรับปรุงคุณภาพได้ดี แต่ถ้าดินนั้นมีค่าดัชนีพลาสติกมากกว่า 30% จะทำให้การผสมวัสดุนั้นกับปูนซีเมนต์ทำได้ยากขึ้น การผสมปูนขาวลงก่อนลำดับแรกจะช่วยให้ค่าดัชนีพลาสติก ของดินลดลงและนอกจากนี้แล้วการผสมปูนขาวยังช่วยเพิ่มความสามารถในการผสมเข้ากัน (Workability) หลังจากนั้นจึงค่อยผสมปูนซีเมนต์ตามทีหลัง

ตารางที่ 2.8 วิธีปรับปรุงคุณภาพของดินที่แปรผันตามขนาดเม็ดดิน

Designation	Fine clays	Coarse clays	Fine silts	Coarse silts	Fine sands	Coarse sands
Soil Particle size (mm.)	< .0006	.0006-.002	.002-0.01	0.01-0.06	0.06-0.4	0.4-2.0
Soil Volume Stability	Very poor	Fair	Fair	Good	Very good	Very good
Type of Stabilisation Application						
LIME	■					
CEMENT	■				■	
BITUMEN					■	
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)

ตารางที่ 2.9 แนวทางเลือกใช้สารผสมเพิ่มกับวัสดุแต่ละชนิด

Admixture	Crushed Rock	Well graded Gravel	Silty/ Clayey Gravel	* Sand	Sandy Silty Clay	Heavy Clay
Cement	A	A	A	B	B	N
Blend Cementations	A	A	A	A	A	N
Hydrate Lime	B	B	A	N	B	A
Hydrate Lime + Cement	N	N	B	N	B	A
Polymeric	B	A	A	B	A	B
Bitumen	A	A	B	B	B	N

Usually very suitable A

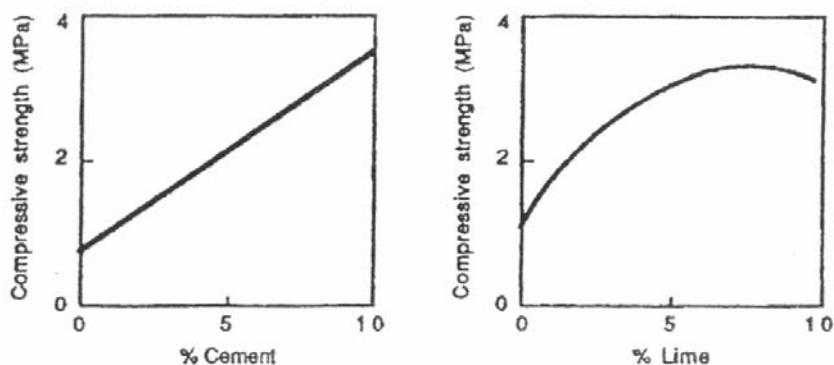
Usually satisfactory B

Usually not suitable N

* Depend upon grading (Single size sand Require higher additive content)

ที่มา: Wilmot (1995)

Mitchell (1976) พบว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้เกิดกำลังอัดของดินเหนียวผสมปูนขาวเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณของซิลิกาในดินมีอยู่จำกัด ดังนั้นหากการเพิ่มปูนขาวมากกว่าความต้องการในการทำปฏิกิริยากับซิลิกาในดิน ปูนขาวที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลให้กำลังลดลงด้วย ซึ่งข้อแตกต่างกับดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับปริมาณสารประสาน

ที่มา: Mitchell (1976)

Awal (1979) กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีพลาสติกของดินผสมปูนซีเมนต์ที่เป็นผลจากการผสมปูนซีเมนต์ พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์จะทำให้ค่าพิกัดพลาสติกของดินเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่จะทำให้ค่าพิกัดเหลวของดินลดลงส่งผลทำให้ดัชนีพลาสติกมีค่าลดลง

Ruenkairergsa (1982) พบว่าสมบัติทางเคมีของดิน จะมีอิทธิพลมากต่อการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินเหนียวและดินตะกอน ส่วนดินที่มีขนาดเม็ดก้อนใหญ่เช่น ทรายจะไม่มีผลมากนัก ดินเหนียวเมื่อผสมด้วยปูนซีเมนต์จะมีการดูดซึ่มประจุไฟฟ้าบวกกัน ดินที่มีประจุไฟฟ้าแคลเซียม (Calcium Ion) จะปรับปรุงได้ยากมาก ส่วนดินที่มีสารอินทรีย์ (Organic Matter) ผสมอยู่ ก็จะมีผลกระทบต่อการทำดินซีเมนต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารอินทรีย์นั้นว่าเป็นชนิดใดและมีปริมาณมากน้อยเพียงใดเช่น พวกเศษไม้ ฟาง หรือ Cellulose จะมีผลเพียงเล็กน้อย ส่วนพวก Glucose และ Trataric Acid จะมีผลมากต่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ซึ่งทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการแข็งตัวช้าขึ้น ส่วนดินที่มีพวกสารซัลเฟตอยู่ เมื่อนำปูนซีเมนต์มาผสมกับดินดังกล่าวจะไม่มีผลกระทบกับช่วงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่จะมีผลที่ต่อเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว ดังนั้นการปรับปรุงดินที่มีสารซัลเฟตอยู่ต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่มีสารต่อต้านซัลเฟต มาผสมจึงได้ผลดี

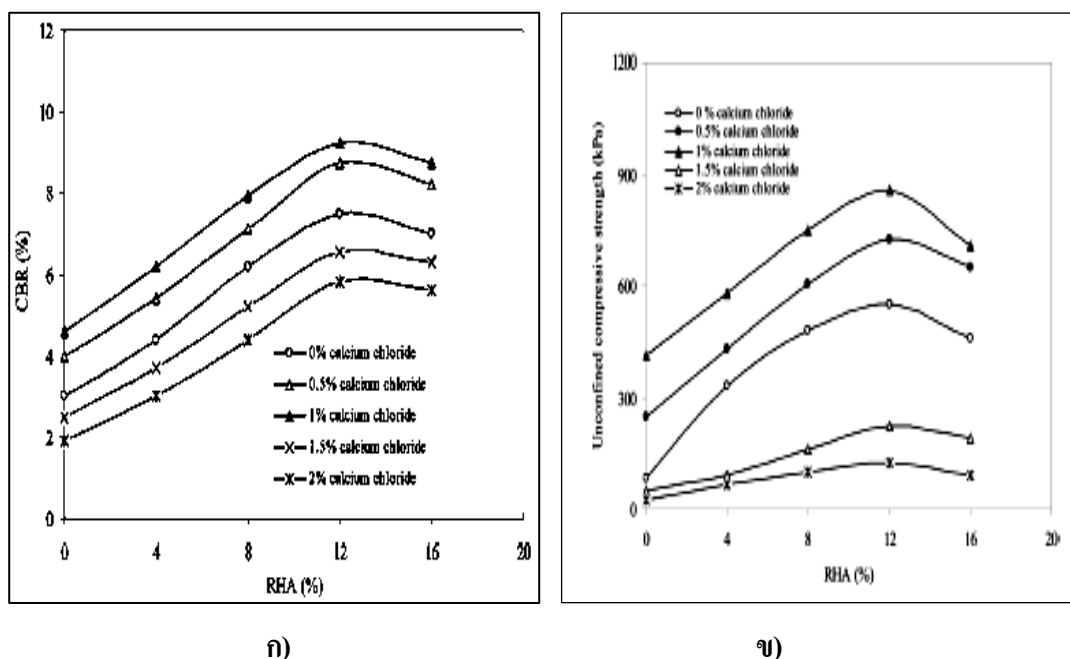
Sherwood (1958) ได้ทดลองเพื่อหาอิทธิพลของสารอินทรีย์ โดยสังเกตความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังและ pH ของดินซีเมนต์ที่ได้จากการผสมดินและปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 10 ทำการทดลองภายหลังการผสมน้ำ 1 ชั่วโมง แล้วนำค่า pH และค่ากำลังมาวิเคราะห์ พบว่าถ้าค่า pH ต่ำกว่า 12.1 แสดงว่าดินที่นำมาใช้ผสมมีสารอินทรีย์ ผสมอยู่จึงทำให้ดินซีเมนต์แข็งตัวได้ช้าและเป็นผลให้กำลังลดต่ำลงเมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน

Lin et al. (2007) ได้ดำเนินการศึกษาเพื่อปรับปรุงสมบัติและกำลังของดินเดิมด้วยเถ้าเตาน้ำมันและปูนขาว เพื่อเป็นการนำดินเหนียวบนชั้นดินเดิมมาเป็นชั้นรองพื้นทาง ในการผสมใช้อัตราส่วนผสมที่ 2% 4% 8% และ 16% โดยน้ำหนักของดินแห้ง หลังจากปรับปรุงด้วยเถ้าจากเตาน้ำมันและปูนขาว ผลพบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ไม่ปรากฏว่าทำกำลังของดินและพฤติกรรมการบวมตัวเปลี่ยนแปลง แต่ผลจากการทดสอบแรงอัดสามแกน พบว่าค่าปัจจัยของแรงเฉือน (C และ ϕ) มีค่าเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นจากเดิม 30 เป็น 50-70 กิโลพาสคัล. ในการผสมเถ้าจากเตาน้ำมันต่อปูนขาวในอัตราส่วนต่างๆส่งผลให้ค่ากำลังของดินเดิมมีค่าเพิ่มขึ้น จึงสามารถนำมาใช้ปรับปรุงสมบัติทางธรณีเทคนิคของดินเหนียวเดิมเพื่อนำมาใช้เป็นดินชั้นรองพื้นทางได้

Chen et al. (2009) ได้ศึกษาปรับปรุงดินเดิมโดยการนำเถ้าตะกอนจากเตาน้ำมันและปูนซีเมนต์มาผสมในอัตราส่วนคงที่ที่ 4:1 ซึ่งใช้เถ้าตะกอนจากเตาน้ำมัน 4 ส่วนต่อปูนซีเมนต์ 1

ส่วน โดยอัตราส่วนผสมทั้งต่อดินอ่อน ในการปรับปรุงค่าการยึดแน่นของดินอ่อนเดิมในอัตราส่วน 2% 4% 8% และ 16% ต่อน้ำหนักดินแห้ง โดยเตรียมตัวอย่างเพื่อการทดสอบ Atterberg Limit, การบดอัด, อัตราส่วนกำลังแบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย กำลังอัดสามแกน ในการทดสอบบ่มตัวอย่างที่อายุ 3 และ 7 วัน ผลพบว่าไม่ทำให้ดินมีคุณภาพดีขึ้นแต่กลับทำให้มีค่าการบวมตัวมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอายุการบ่มมากขึ้นเป็น 30 วัน ทดสอบค่าอัตราส่วนแรงแบกทานแคลิฟอร์เนียปรากฏพบว่าดินมีคุณภาพดีขึ้น

Sharma et al. (2008) ได้นำเสนอผลการปรับปรุงดินเหนียวที่เปลี่ยนสภาพด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ปูนขาวและเถ้าแกลบ ซึ่งอัตราส่วนผสมที่ใช้ในการผสมของแคลเซียมคลอไรด์ ปูนขาวและเถ้าแกลบเปลี่ยนแปลงจาก 0-2% 0-5% และ 0-16% ตามลำดับ โดยน้ำหนักของดินแห้ง โดยดำเนินการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและค่าอัตราส่วนแรงแบกทานแคลิฟอร์เนีย และศึกษาพฤติกรรมของความเค้น-ความเครียดของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยวัสดุดังกล่าว พบว่าการผสมปูนขาวจาก 0-5% และแคลเซียมคลอไรด์ถึง 0-1% ผลพบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 225% ถึง 328% ข้อสังเกตการใช้ส่วนของแคลเซียมคลอไรด์ที่ 1% ปูนขาว 4% และเถ้าแกลบที่ 12% พบว่าดินตัวอย่างให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวและค่าอัตราส่วนแรงแบกทานแคลิฟอร์เนียสูงสุดดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 พฤติกรรมทางเชิงกลดินเหนียวหลังปรับปรุง ก) พฤติกรรมของค่าอัตราส่วนแรงแบกทานแคลิฟอร์เนียและ ข) พฤติกรรมของค่ากำลังอัดแกนเดียว

ที่มา: Sharma et al. (2008)

Prabakar et al. (2004) ได้ดำเนินการศึกษาการปรับปรุงดินอ่อน ในการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ บนชั้นดินอ่อน ซึ่งต้องใช้ความรู้ขั้นสูงทางด้านเทคนิคเพราะฐานรากของสิ่งปลูกสร้างที่วางอยู่บนชั้นดินอ่อน จะเกิดปัญหาการทรุดตัวที่ต่างกัน รับกำลังไม่ได้และมีการยุบอัดตัวสูง โดยทั่วไปฐานรากจะเป็นรูปแบบผสมขึ้นอยู่กับดินแต่ละชนิดและต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการก่อสร้าง ในการปรับปรุงดินอ่อนด้วยเถ้าลอย ในอัตราส่วนที่ 9-46% โดยน้ำหนักของดินแห้ง พบว่าดินอ่อนมีสมบัติดีขึ้นจากการทดสอบการบดอัด การทรุดตัว อัตราส่วนแรงแบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย มีค่าเพิ่มขึ้น

Yang et al. (2006) ได้ศึกษาการปรับปรุงดินที่เจือปนสารตะกั่วโดยการผสมปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่งและเถ้าแกลบ เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเจือปนของสารตะกั่วในดินขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของสารในดินที่อยู่ในดินตัวอย่าง การศึกษาสมบัติทางกายภาพหลังจากการปรับปรุงได้ดำเนินการทดสอบการบดอัด กำลังอัดแกนเดียว โดยกำหนดระยะเวลาการบ่มที่อายุ 1, 3, 7, 14, 28 และ 56 วัน ของทุกอัตราส่วนผสมและตรวจการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี การตกผลึก และการไหลซึมของสารตะกั่ว พบว่าเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่งและเถ้าแกลบมาปรับปรุงทำให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้นตามร้อยละของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้นและตามอายุการบ่มที่มากขึ้นด้วย

Goktepe et al. (2006) ดำเนินการศึกษการปรับปรุงดินเหนียวหรือดินเหมือนดินเหนียวด้วยเถ้าลอย โดยศึกษาผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกล เวลาบ่ม ขนาดของเม็ดดินเหนียวมีผลต่อการออกแบบอัตราส่วนผสมและอายุการบ่ม หลังจากการผสมเถ้าลอยดำเนินการศึกษาโดยจำแนกตามอัตราส่วนผสมและอายุการบ่ม การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกสูงที่อัตราส่วน 5% 10% 15% และ 20% ของเถ้าลอย กำหนดอายุบ่มที่ 1 7 28 และ 90 วัน พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้นตามร้อยละที่ผสมเพิ่มขึ้นของเถ้าลอยและอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น

Kolias et al. (2005) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเถ้าลอยแคลเซียมสูงและปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงดินเม็ดละเอียดที่มีค่าพลาสติกต่ำและค่าพลาสติกสูง (CL และ CH) โดยดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการทดสอบ ทดสอบกำลังอัด ทดสอบแรงดึงและแรงอัด โดยเปลี่ยนแปลงร้อยละของอัตราส่วนของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ ดำเนินการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุบ่ม 90 วัน และค่าอัตราส่วนแรงแบกทานแคลิฟอร์เนีย แบบแช่น้ำ พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนแบกทานแคลิฟอร์เนีย มีค่าเพิ่มขึ้นตามร้อยละที่เพิ่มขึ้นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงและปูนซีเมนต์และอายุการบ่ม

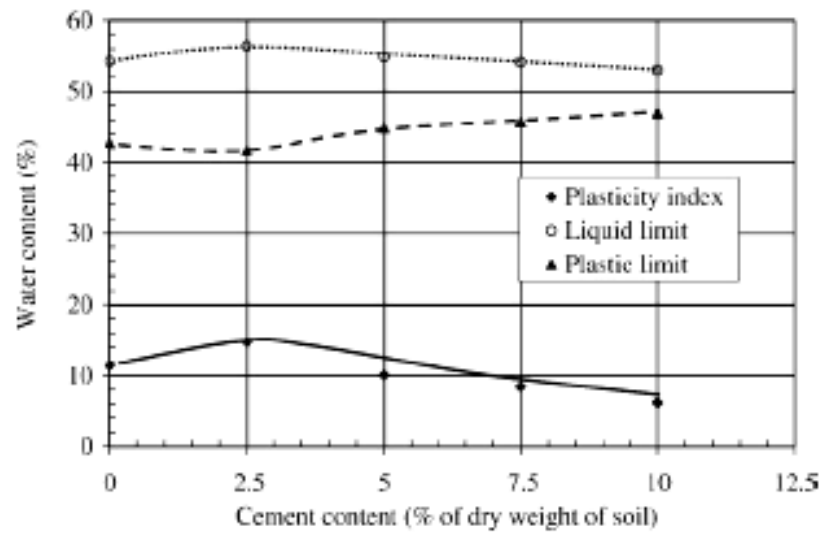
Misra et al. (2005) ศึกษาพฤติกรรมทางกายภาพและเชิงกลของดินเหนียวผสมด้วยเถ้าลอยชั้น C และประเมินผลในห้องปฏิบัติการทดสอบเพื่อปรับปรุงดินเหนียวเป็นวัสดุรองรับพื้นทางของถนน เพื่อศึกษาศึกษาสมรรถนะในการประสานตนเองของเถ้าลอยชั้น C กับดินเดิมในพื้นที่

เพื่อใช้เป็นชั้นรองพื้นทาง ผลพบว่า อายุการบ่ม สภาพการบ่ม องค์ประกอบทางเคมีของแร่ในดินเหนียว ปริมาณของเกลือลอยและประสิทธิภาพการบวมตัวเป็นปัจจัยและตัวแปรสำคัญต่อค่ากำลังอัดแกนเดียว การบวมตัวของดินตัวอย่างที่ผสมด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ จะเปลี่ยนแปลงจาก 2.4 และ 6% ส่วนเกลือลอยชั้น C เปลี่ยนแปลงจาก 5.10 และ 20% โดยดินเค็มที่ปรับปรุงสามารถนำมาใช้เป็นชั้นรองพื้นทางได้

Lee et al. (2005) ได้ดำเนินการทดสอบกำลังอัดและค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของดินเหนียวน้ำทะเลสังเคราะห์ผสมปูนซีเมนต์เพื่อหาค่าอัตราส่วนดินซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่นำมาใช้ในการดำเนินการอัดฉีดน้ำปูนว่าส่วนผสมนั้นมีค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของส่วนผสมดินซีเมนต์ ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวทะเลที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์แสดงค่าให้เห็นว่า อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และอัตราส่วนดินซีเมนต์ เป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มกำลังอัดและค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นและยังพบว่าสภาพการผสมในดินแห้งกับดินเปียก (Slurry Clay) ให้ค่ากำลังอัดและ โมดูลัสของความยืดหยุ่นต่างกันด้วย

Murty et al. (2008) เสนอเทคนิคการปรับปรุงดินหลายวิธีรวมถึง การบดอัดดิน เปลี่ยนสภาพ โดยการใช้ทรายรองชั้น โครงสร้างและดินเหนียวไม่บวมตัว ดินรองรับความกว้าง โครงสร้างเป็นวัสดุ โครงที่เป็นวัสดุเบาเป็นพิเศษเพื่อรองรับฐานราก ผิวจราจรและคลองส่งน้ำ การใช้ดินเหนียวไม่บวมตัวเป็น เช่น ชั้นทรายรองรับชั้นโครงสร้างในการทำงานสนาม ฉะนั้นใน การศึกษาเมื่อนำดินเหนียวมาประยุกต์ใช้ในงานชั้นรองโครงสร้างชนิดต่างๆ ซึ่งใช้แคลเซียมคลอไรด์และเถ้าแกลบ ทั้ง 2 ชนิดมาผสมในดินคือ ดินเหนียว+0.5% ของแคลเซียมคลอไรด์+8% ของเถ้าแกลบและดินเหนียว+1% ของแคลเซียมคลอไรด์+6%ของเถ้าแกลบ ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว ที่อัตราส่วนผสมที่ดินเหนียว+0.5%ของแคลเซียมคลอไรด์+8%ของเถ้าแกลบ เป็นอัตราส่วนผสมที่ประหยัดค่าใช้จ่าย เพราะใช้แคลเซียมคลอไรด์ในปริมาณต่ำสุด สามารถนำมาในงานฐานราก ผิวจราจร คลองส่งน้ำ เป็นการปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมีที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

Sariosseiri et al. (2009) ได้กล่าวถึงผลการศึกษาในการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวในรัฐออซิงตัน ในสหรัฐอเมริกา โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งที่ 2.5% 5% 7.5% และ 10% โดยน้ำหนักของดินแห้ง ในการปฏิบัติการทดสอบใช้อัตราส่วนของดินแห้ง ทำการทดสอบพิกัดอัตราเบอร์ริก (Atterberg Limit) การบดอัด กำลังอัดแกนเดียวและการอัดตัวคายน้ำแบบไม่ระบายน้ำ ผลพบว่าค่าดัชนีพลาสติกมีค่าลดลงตั้งรูปที่ 2.18 กำลังอัดแกนเดียว กำลังเฉือนและพฤติกรรมกรรมกรวิบัติรวมถึงความสามารถทำงานได้เปลี่ยนดีขึ้น ค่ากำลังอัดแกนเดียวและค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งที่เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.18 พฤติกรรมของค่าพิกัดอัตราเบร็กของดินหลังปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง

ที่มา: Sariosseiri et al. (2009)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ดินเหนียวอ่อนสงขลา (ในงานวิจัยนี้เรียกว่า SC) ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นดินชั้นดินเดิม (Subgrade) ความลึกของดินตัวอย่างในการทำการศึกษาวิจัยอยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 1.50-2.00 เมตร จากผิวดินเดิม ที่บริเวณพื้นที่สวนเฉลิมพระเกียรติ 72 พรรษามหาราชนี ในเขตเทศบาลนครสงขลา จังหวัดสงขลา โดยเก็บตัวอย่างแบบเปลี่ยนแปลงสภาพ (Disturbed Sample) และตัวอย่างดินเหนียวแบบคงสภาพ (Undisturbed Sample) การเก็บตัวอย่างทำโดยการใช้เครื่องเจาะเก็บด้วยมือหรือใช้รถขุดดิน เก็บตัวอย่างบรรจุในถุงพลาสติกที่มีดปากถุงปิดสนิท จากนั้นนำดินตัวอย่างใส่ถังพลาสติกปิดฝาเพื่อป้องกันความชื้นระเหยออกจากตัวอย่างดิน



ก)



ข)

รูปที่ 3.1 ดินเหนียวอ่อนสงขลาเป็นดินที่นำมาใช้ในการศึกษา ก) ดินคงสภาพและ ข) ดินเสียสภาพ

เถ้าแกลบ ใช้เถ้าแกลบที่ได้จากการนำแกลบ (เปลือกข้าว) จากนาข้าวในอำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา โดยการนำมาใส่ลงในท่อซีเมนต์ แล้วดำเนินการเผาจนแกลบกลายเป็นเถ้าสีขาวขุ่นปนเทาเล็กน้อยแล้วจึงนำไปบดด้วยโม่ลูกกลิ้ง เถ้าแกลบตัวอย่างที่บดแล้วจึงนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 (ในงานวิจัยนี้เรียกว่า RHA)



รูปที่ 3.2 ที่มาและขั้นตอนการเตรียมเถ้าแกลบ ก) ข้าว ข) แกลบ ค) เถ้าแกลบหลังเผา ง) ร่อนผ่านตะแกรงเอาเฉพาะส่วนที่เป็นสีขาวขุ่น จ) บดละเอียด ฉ) ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และ ช) เถ้าแกลบที่ใช้ในการทดสอบ

เถาไม้ยางพารา ได้รับการสนับสนุนจากโรงงานที่ใช้ไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงในการอบไม้ยางพาราในเทศบาลตำบลบ้านพรุ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา โดยนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 (ในงานวิจัยนี้เรียกว่า RWA)



รูปที่ 3.3 ที่มาและการเตรียมเถาไม้ยางพารา ก) ต้นไม้ยางพารา ข) ท่อนไม้ยางพารา ค) เถาไม้ยางพารา จากปล่องควันไฟ ง) ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และ จ) เถาไม้ยางพาราที่ใช้ในการทดสอบ

3.2 การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบเป็นการเตรียมตัวอย่างจากการเก็บตัวอย่างแบบเปลี่ยนแปลงสภาพ (Disturbed Sample) นำมาผสมเถาแกลบและเถาไม้ยางพารา แล้วดำเนินการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) การเตรียมก่อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.80 เซนติเมตร สูง 8.41 เซนติเมตร ปริมาตรเท่ากับ 96.4 เซนติเมตร³ ตามมาตรฐาน ASTM D 698 โดยใช้ Mini Compactor น้ำหนักเหล็กกระทู้ (Hammer) 0.97 กิโลกรัม ระยะยก 7.5 เซนติเมตร จำนวนชั้นในการกระทู้

4 ชั้น จำนวนครั้งที่กระทุ้งในแต่ละชั้น 20 ครั้ง/ชั้น ปริมาตรของ Mold และพลังงานในการอัดแบบมาตรฐาน เท่ากับ 6 กก-ซม./ซม.³ ดังรูปที่ 3.1 โดยค่าเปรียบเทียบในการใช้พลังงานของการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) กับการใช้พลังงานที่ได้จากการบดอัดโดยใช้แบบ Mini Compactor ดังตารางที่ 3.1

การเตรียมตัวอย่างทุกตัวอย่างได้รับพลังงานในการบดอัดเท่ากัน ตัวอย่างที่ใช้จะประกอบไปด้วย ภูมิของดินเหนียวสงขลาที่ยังไม่ได้ปรับปรุงสมบัติและภูมิของดินเหนียวสงขลา หลังจากปรับปรุงสมบัติด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา โดยจากงานวิจัยในอดีตการใส่สารผสมเพิ่มหากไม่ใช่ปูนซีเมนต์ค่ากำลังอัดสูงสุดที่อัตราส่วนการผสมประมาณ 15-40% งานวิจัยนี้จึงกำหนดอัตราส่วนการผสมเพื่อจะให้เห็นแนวโน้มการลดลงของค่ากำลังอัดที่อัตราส่วนการผสมด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา 50% เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบในการศึกษานี้แยกออกเป็นหลายอัตราส่วน โดยผสมต่อน้ำหนักดินแห้ง ดังนั้นจึงกำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้เพื่อความชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ในการเตรียมก้อนดินตัวอย่างจะใช้ปริมาณน้ำที่จุดปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) ก้อนดินตัวอย่างที่เตรียมเสร็จแล้วจะทำการห่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกสำหรับถนอมอาหารเพื่อป้องกันความชื้นไม่ให้ระเหยออกและห่อด้วยแผ่นอลูมิเนียมเพื่อกันแสงอีกชั้นหนึ่ง โดยใส่ถุงพลาสติกและเก็บไว้ในกล่องโฟมที่มีฝาปิดมิดชิด ภายในกล่องโฟมมีการควบคุมความชื้น โดยการนำกล่องโฟมที่บรรจุตัวอย่างไปแช่น้ำไว้ในอ่างน้ำโดยมีน้ำล้อมรอบกล่องโฟมเพื่อควบคุมความชื้นในอากาศ บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 1 7 14 28 และ 56 วัน ตามลำดับดังในรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 พลังงานที่ใช้ในการบดอัดโดยวิธีบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test) และการบดอัดโดยใช้เป่าบดอัดขนาดเล็ก (Mini Compactor)

ค่าแสดงหรือปริมาณ	Standard Proctor	Mini Compactor
ปริมาตรของ Mold (ซม. ³)	944	96.4
น้ำหนักเหล็กกระทุ้ง (กก.)	2.5	0.97
จำนวนชั้นในการกระทุ้ง (ชั้น)	3	4
จำนวนครั้งที่กระทุ้งในแต่ละชั้น (ครั้ง/ชั้น)	25	20
ระยะยก (ซม.)	30.5	7.5
พลังงานในการบดอัด (กก-ซม./ซม. ³)	6	6

ที่มา: ธนิตและคณะ (2548)

ตารางที่ 3.2 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการกำหนดอัตราส่วนในการวิจัย

สูตร	RHA (%)	RWA (%)	SC (%)	สัญลักษณ์
1	0	0	100	SC
2	5	0	95	RHA5
3	10	0	90	RHA10
4	15	0	85	RHA15
5	20	0	80	RHA20
6	25	0	75	RHA25
7	30	0	70	RHA30
8	35	0	65	RHA35
9	40	0	60	RHA40
10	50	0	50	RHA50
11	0	5	95	RWA5
12	0	10	90	RWA10
13	0	15	85	RWA15
14	0	20	80	RWA20
15	0	25	75	RWA25
16	0	30	70	RWA30
17	0	35	65	RWA35
18	0	40	60	RWA40
19	0	50	50	RWA50
20	5	5	90	RHA5RWA5
21	5	10	85	RHA5RWA10
22	10	5	85	RHA10RWA5
23	5	15	80	RHA5RWA15
24	10	10	80	RHA10RWA10
25	15	5	80	RHA15RWA5
26	5	20	75	RHA5RWA20
27	10	15	75	RHA10RWA15

ตารางที่ 3.2 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการกำหนดอัตราส่วนในการวิจัย (ต่อ)

สูตร	RHA (%)	RWA (%)	SC (%)	สัญลักษณ์
28	15	10	75	RHA15RWA10
29	20	5	75	RHA20RWA5
30	5	25	70	RHA5RWA25
31	10	20	70	RHA10RWA20
32	15	15	70	RHA15RWA15
33	20	10	70	RHA20RWA10
34	25	5	70	RHA25RWA5
35	5	30	65	RHA5RWA30
36	15	20	65	RHA15RWA20
37	20	15	65	RHA25RWA10
38	30	5	65	RHA30RWA5
39	5	35	60	RHA5RWA35
40	10	30	60	RHA10RWA30
41	20	20	60	RHA20RWA20
42	30	10	60	RHA30RWA10
43	35	5	60	RHA35RWA5
44	10	40	50	RHA10RWA40
45	20	30	50	RHA20RWA30
46	25	25	50	RHA25RWA25
47	30	20	50	RHA30RWA20
48	40	10	50	RHA40RWA10



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ของชุดทดสอบ Mini Compactor และเครื่องมือสำหรับการเตรียมก้อนตัวอย่าง ก) ชิ้นส่วนของชุดทดสอบ Mini Compactor ข) การประกอบ Mini Compactor และ ค) ก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 3.5 การบ่มสำหรับการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ก) ตัวอย่างห่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกสำหรับ
ถนอมอาหารและแผ่นอะลูมิเนียม ข) เก็บตัวอย่างบรรจุในกล่องโฟม และ ค) การบ่มตัวอย่าง
ในกล่องโฟมวางไว้ในอ่างน้ำที่มีน้ำล้อมรอบเพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

3.3 การทดสอบสมบัติของวัสดุ

3.3.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวสงขลา เถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา

- 1) การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักรวม (Total Unit Weight) ตามมาตรฐาน ASTM D 3282
- 2) การทดสอบหาปริมาณความชื้นในมวลดิน (Water Content) ตามมาตรฐาน ASTM D 2216
- 3) การทดสอบค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) และค่าพิกัดพลาสติก (Plastic Limit) ตามมาตรฐาน ASTM D 4318
- 4) การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ตามมาตรฐาน ASTM D 854
- 5) การวิเคราะห์การกระจายขนาดเม็ดดิน (Grain Size Distribution) เทคนิคการทดสอบวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยลำแสงเลเซอร์ เครื่องมือทดสอบ Laser Particle Size Analyzer (COULTER LS 230), Dry Powder Module วิธีการทดสอบอ้างอิง WI-RES-LSPA-001 สภาวะการทดสอบวัดการกระจายของอนุภาคตัวอย่างด้วยของเหลว (น้ำ) Run Speed 60 % Model Garnet.rfd PIDS included ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์ดิน โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- 6) การจำแนกดินแบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS) ตามมาตรฐาน ASTM D 2487

3.3.2 การทดสอบสมบัติทางเชิงกลของดินเหนียวสงขลา

- 1) การทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 698
- 2) การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test, UCT) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166
- 3) การทดสอบกำลังแบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย (California Bearing Ratio Test, CBR Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 1883
- 4) การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) แบบ One-Dimension ตามมาตรฐาน ASTM D 2435

3.3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวอ่อนสงขลา

- 1) การทดสอบหาปริมาณสารอินทรีย์ (Organic Matter) ตามมาตรฐาน ASTM D 632-84
- 2) การทดสอบค่า pH เครื่องมือทดสอบ pH meter (Sension1) วิธีการทดสอบอ้างอิง REF-RES-003 Rev.0 สภาวะการทดสอบการวัดการกระจายของอนุภาคตัวอย่างด้วยของเหลว (น้ำ) Run speed 60 % Model Garnet.rfd PIDS included ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์ดิน โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- 3) การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ (Chloride) เทคนิคการทดสอบ Spectroquant เครื่องมือทดสอบ Spectroquant NOVA 60 วิธีการทดสอบอ้างอิง REF-RES-Wet Lab -001
- 4) การทดสอบหาปริมาณซัลเฟต (Sulphate) เทคนิคการทดสอบ Spectroquant เครื่องมือทดสอบ Spectroquant NOVA 60 วิธีการทดสอบอ้างอิง REF-RES-Wet Lab-001 Rev.0 ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์ดิน โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- 5) วิเคราะห์แร่ประกอบในดินเหนียวสงขลาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เครื่องมือเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (PHILIPS X'Pert MPD) วิธีการทดสอบตามรายละเอียด ในการปฏิบัติงานการใช้เครื่อง (WI-RES-XRF-001) ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์ดิน โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- 6) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรมิเตอร์ (X-Ray fluorescence spectrometer, PHILIPS PW2400) วิธีการทดสอบอ้างอิง WI-RES-XRF-001 และ WI-RES-XRF-002 ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์ดิน โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3.3.4 การวิเคราะห์แร่ประกอบในถ้ำกลบและถ้ำไม้ยางพารา

การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ที่ประกอบอยู่ในถ้ำกลบและถ้ำไม้ยางพารา ใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เครื่องมือทดสอบ PHILIPS X'Pert MPD วิธีการทดสอบตามรายละเอียด ในการปฏิบัติงานการใช้เครื่อง (WI-RES-XRD-001) ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ในดิน โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3.3.5 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา

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

3.3.6 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคเพื่อเป็นการศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุที่นำมาปรับปรุงดินถึงความเหมาะสมทางรูปร่างและผลของรูปร่างในการเกิดปฏิกิริยา เทคนิคการทดสอบถ่ายภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JSM-5800LV, JEOL) วิธีการทดสอบอ้างอิง WI-RES-SEM5800-001 และ WI-RES-SEM-001 สภาวะทดสอบ High Vacuum mode ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์ดิน โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของดินเหนียวอ่อนสงขลากรณีหลังปรับปรุง

3.4.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

- 1) การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ตามมาตรฐาน ASTM D 854
- 2) การทดสอบค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) และค่าพิกัดพลาสติก (Plastic Limit)

ตามมาตรฐาน ASTM D 4318

3.4.2 การทดสอบการบดอัด

การทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 698 เพื่อหาค่า ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) เพื่อใช้ในการเตรียมตัวอย่างในทุกอัตราส่วนการผสม ที่ใช้ในการทดสอบการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) การทดสอบ

อัตราส่วนแรงแบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย (California Bearing Ratio, CRB) และทดสอบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test)

3.4.3 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบเป็นการเตรียมตัวอย่างจากการเก็บตัวอย่างแบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Sample) นำมาผสมเข้าเกลบและเข้าไม้ยางพาราพลังงานที่ใช้ในการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) ตามมาตรฐาน ASTM D 698 ในการเตรียมตัวอย่างจะใช้ปริมาณน้ำที่จุดเหมาะสมสูงสุด (OMC) บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 1 7 14 28 และ 56 วันตามลำดับ ในทุกอัตราส่วนการผสม แต่ละกรณีทดสอบ 3 ตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์หาค่ากำลังอัด ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) และค่าเครียดที่จุดวิบัติ (Strain at Failure) ของดินเหนียวสงขลากรณีที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเข้าเกลบ และเข้าไม้ยางพารา

3.4.4 การทดสอบอัตราส่วนแรงแบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย

การทดสอบอัตราส่วนแรงแบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย (California Bearing Ratio Test, CBR Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 1883 การเตรียมตัวอย่าง โดยการทดสอบเป็นการเตรียมตัวอย่างแบบเปลี่ยนสภาพนำมาผสมเข้าเกลบและเข้าไม้ยางพารา พลังงานที่ใช้ในการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) ตามมาตรฐาน ASTM D 698 ในการเตรียมตัวอย่างจะใช้ปริมาณน้ำที่จุด OMC บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 1 7 14 28 และ 56 วัน ตามลำดับ เฉพาะดินเหนียวสงขลากรณีที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ (SC) และดินเหนียวสงขลาหลังจากปรับปรุงสมบัติด้วยเข้าเกลบและเข้าไม้ยางพาราที่อัตราส่วนที่ให้กำลังอัดสูงสุดเท่านั้น แต่ละกรณีทดสอบ 3 ตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์ในการใช้เป็นวัสดุงานทาง

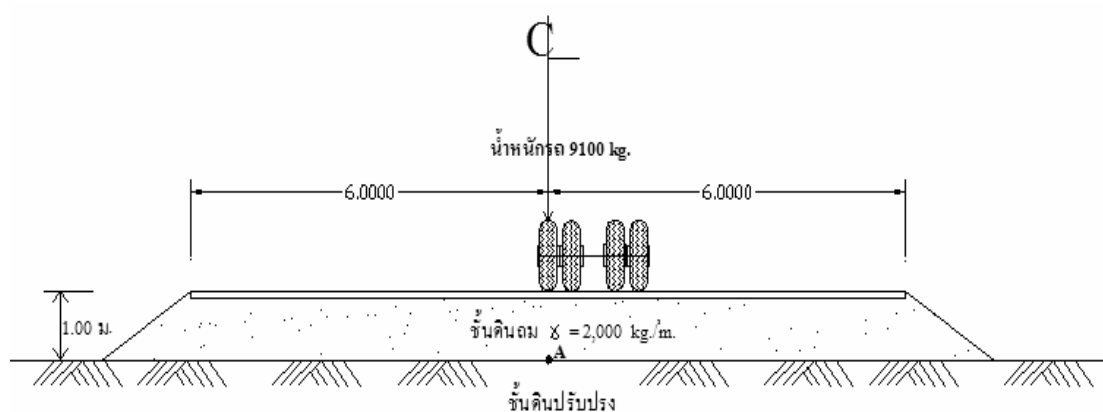
3.4.5 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM D 2435 การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบเป็นการเตรียมตัวอย่างจากการเก็บตัวอย่างแบบเปลี่ยนสภาพนำมาผสมเข้าเกลบและเข้าไม้ยางพารา พลังงานที่ใช้ในการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) ตามมาตรฐาน ASTM D 698 ในการเตรียมตัวอย่างจะใช้ปริมาณน้ำที่จุดความชื้นที่เหมาะสม (OMC) บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 7

และ 14 วันเฉพาะดินเหนียวอ่อนสงขลากรณีที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ (SC) และดินเหนียวสงขลาหลังปรับปรุงสมบัติด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราที่อัตราส่วนที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดเท่านั้นในการทดสอบใช้น้ำหนักที่มากกระทำกับตัวอย่าง 2 กรณี

กรณีที่ 1 ใช้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุดที่อายุบ่ม 14 วัน มาเป็นความดันที่มากกระทำต่อดินตัวอย่าง (เพื่อเป็นข้อมูลที่จะนำไปใช้งานในพื้นที่ก่อสร้าง เพราะเวลาเป็นปัจจัยสำคัญในการดำเนินการก่อสร้างในพื้นที่ จึงใช้เวลาบ่มที่เร็วที่สุดเพื่อให้สอดคล้องกับการนำไปใช้งาน)

กรณีที่ 2 โดยการประยุกต์ใช้น้ำหนักที่มากกระทำจากน้ำหนักของรถยนต์บรรทุก (โดยกำหนดน้ำหนักจากรถยนต์บรรทุกประเภทที่มีน้ำหนักสูงที่สุด ซึ่งเป็นการกำหนดน้ำหนักที่มากกระทำโดยประมาณ เพราะเป็นการทดลองประยุกต์ใช้น้ำหนักจากรถยนต์เพียงเท่านั้น) รวมกับน้ำหนักของดินถมที่กระทำจุด A มาเป็นน้ำหนักที่กระทำต่อดินตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 และ 14 วัน ดังรูปที่ 3.6 (เหตุผลเช่นเดียวกับกรณีแรก แต่ลดเวลาบ่มให้น้อยลงอีกเมื่อประยุกต์ใช้กับน้ำหนักรถยนต์ที่มากกระทำต่อถนน)



รูปที่ 3.6 น้ำหนักรถบรรทุกพ่วงและน้ำหนักดินถมคันทางที่มากกระทำต่อชั้นดินปรับปรุงจุดที่ A

หาน้ำหนักกระทำที่จุด $\sigma_A = \sigma_1 + \sigma_2$

σ_1 = จากน้ำหนักรถบรรทุก เมื่อ $P = 9100$ กก. ดังสมการที่ 3.1 จากทฤษฎีของ Bossinesq (คศ. 1883)

$$\sigma_1 = \frac{IP}{Z^2} \quad (3.1)$$

ใช้ I เมื่อ $\beta = 0$, $r = 0$ จากตารางที่ 2.7

$$I = \frac{r}{z} = \frac{0}{1} = 0 = 0.778$$

$$\sigma_1 = \frac{0.778 \times 9100}{1^2} = 7080 \text{ กก./ม.}^2$$

σ_2 = จากน้ำหนักดินถมคันทาง เมื่อ $\gamma = 2000$ กก./ม.³ สูง = 1 ม. ดังสมการที่ 2

$$\sigma_2 = \gamma h \quad (3.2)$$

$$\sigma_2 = 2000 \times 1 = 2000 \text{ กก./ม.}^2$$

$$\sigma_A = 7080 + 2000 = 9080 \text{ กก./ม.}^2$$

เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราในการช่วยลดอัตราทรุดตัว โดยค่าคงตัวของการอัดตัวประกอบด้วย

1. ค่าความดันดินเคยอัดตัวมาก่อน (Pre consolidation Pressure, P')
2. ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัว (Coefficient of consolidation, C_v)
3. ค่าดัชนีอัดตัว (Compression Index, C_c)
4. ค่าดัชนีอัดตัว (Recompression Index, C_r)
5. ค่าสัมประสิทธิ์การซึม (Coefficient of Permeability, k)

3.4.6 การศึกษาองค์ประกอบแร่

1) การศึกษาองค์ประกอบแร่ที่เกิดขึ้นใหม่เฉพาะกรณีที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา ที่อายุการบ่ม 28 วัน เทคนิคการทดสอบเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟรกชัน เครื่องมือทดสอบเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (PHILIPS X'Pert MPD) วิธีการทดสอบตามรายละเอียด ในการปฏิบัติงานการใช้เครื่อง XRD (WI-RES-XRD-001) ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์ โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

2) การศึกษาองค์ประกอบแร่เฉพาะอัตราส่วนที่ตัวอย่างให้ค่ากำลังอัดสูงสุดเท่านั้น ที่อายุการบ่ม 7 14 28 และ 56 วันตามลำดับ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เครื่องมือ PHILIPS X'Pert MPD ตามรายละเอียด ในการปฏิบัติงานการใช้เครื่อง XRD (WI-RES-XRD-001)

3.4.7 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคที่อายุการบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน ตามลำดับเฉพาะอัตราส่วนที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดเท่านั้น การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเพื่อเป็นการศึกษาการเกิดแร่แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต (CAH) เทคนิคการทดสอบการถ่ายภาพจุลทรรศน์

อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JSM-5800LV, JEOL) วิธีการทดสอบอ้างอิง WI-RES-SEM5800-001 และ WI-RES-SEM-001 สภาวะทดสอบ High Vacuum mode ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์ โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3.4.8 การทดสอบด้วยชุดทดสอบทางวิศวกรรม

การในดำเนินการทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียวดังในรูปที่ 3.7 ก) การดำเนินการทดสอบ CBR ดังในรูปที่ 3.7 ข) และการทดสอบการอัดตัวคายน้ำดังในรูปที่ 3.7 ค)



ก)



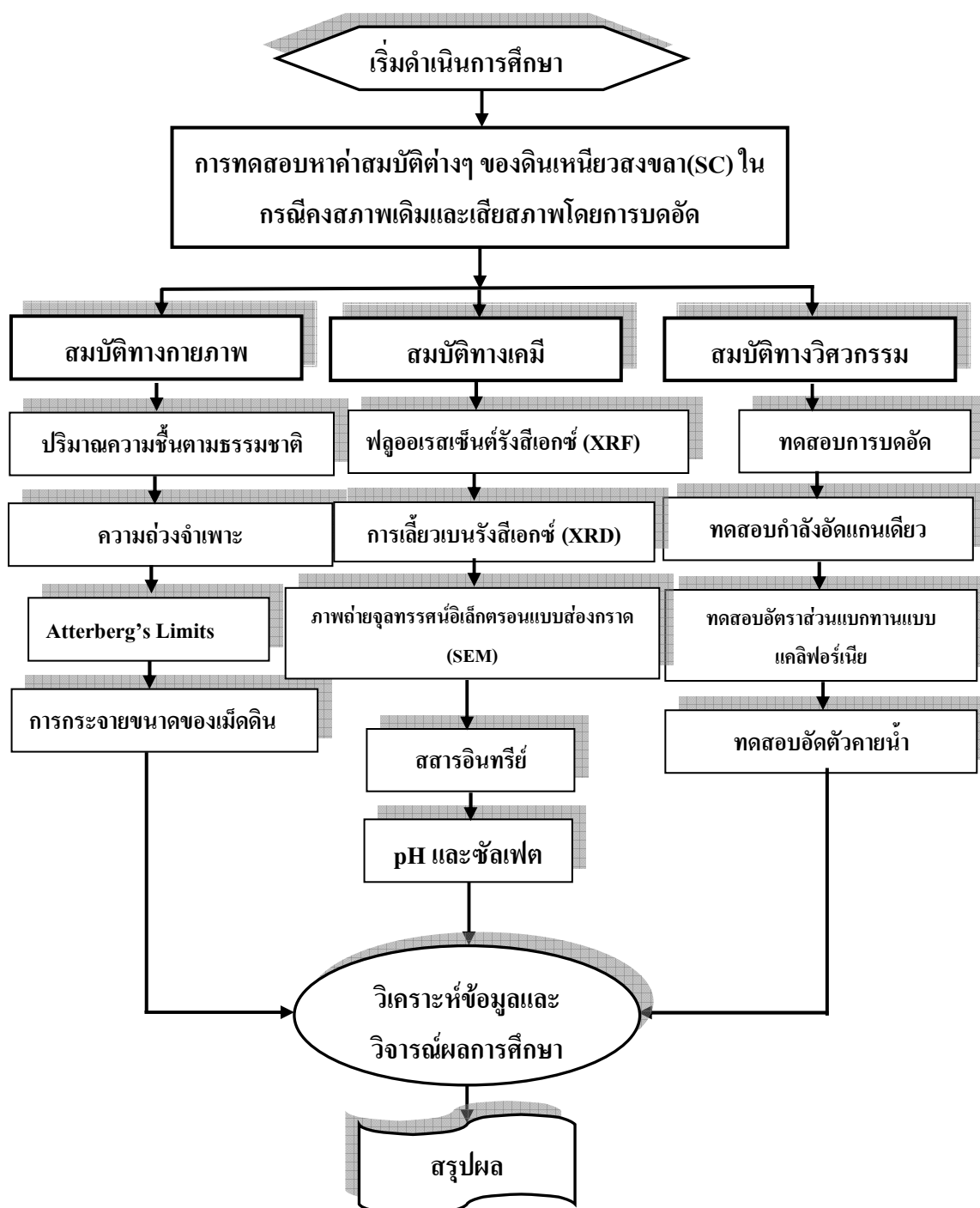
ข)



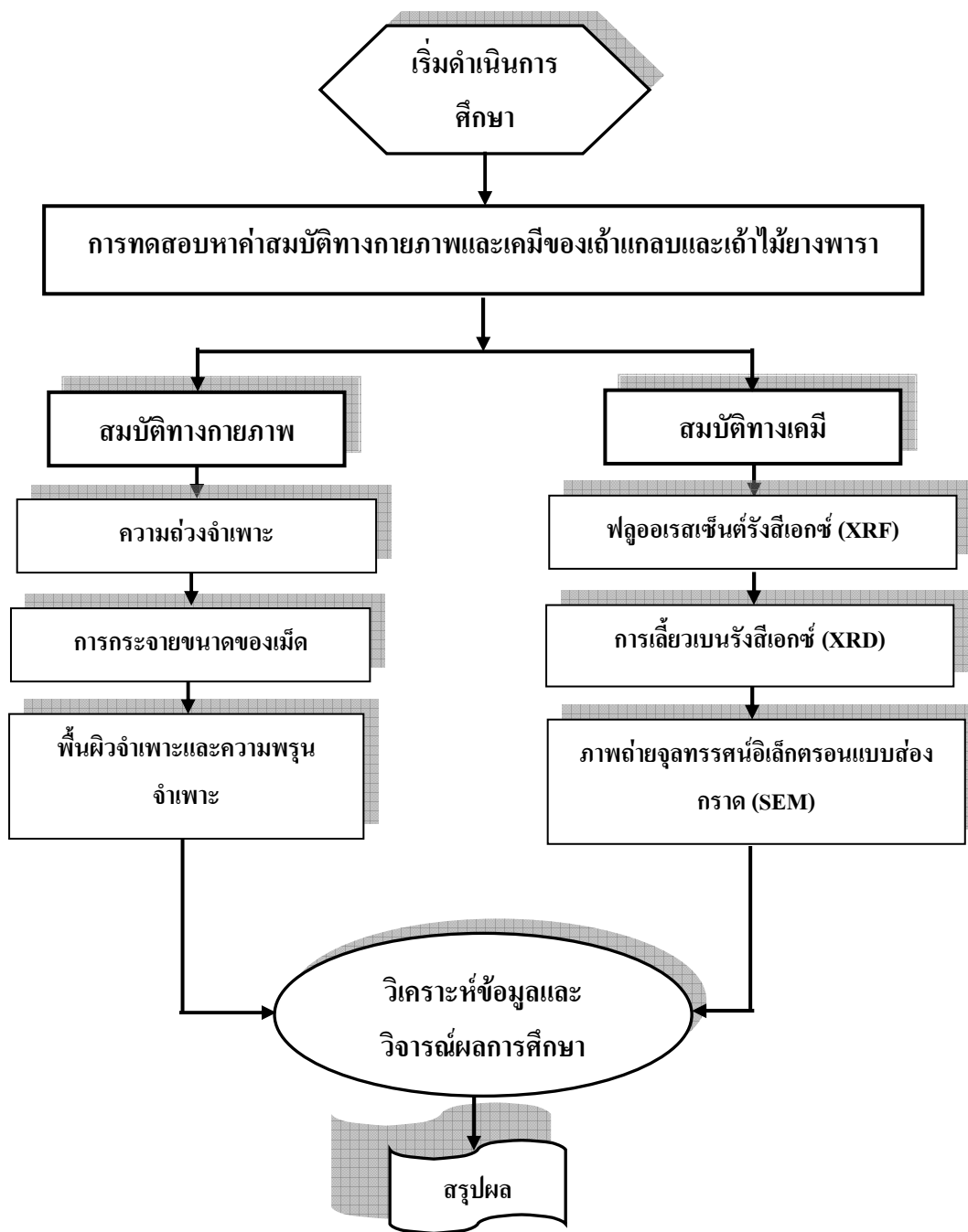
ค)

รูปที่ 3.7 การทดสอบดินตัวอย่าง ก) การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (UCT) ข) การทดสอบกำลังแบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย (CRB Test) และ ค) การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test)

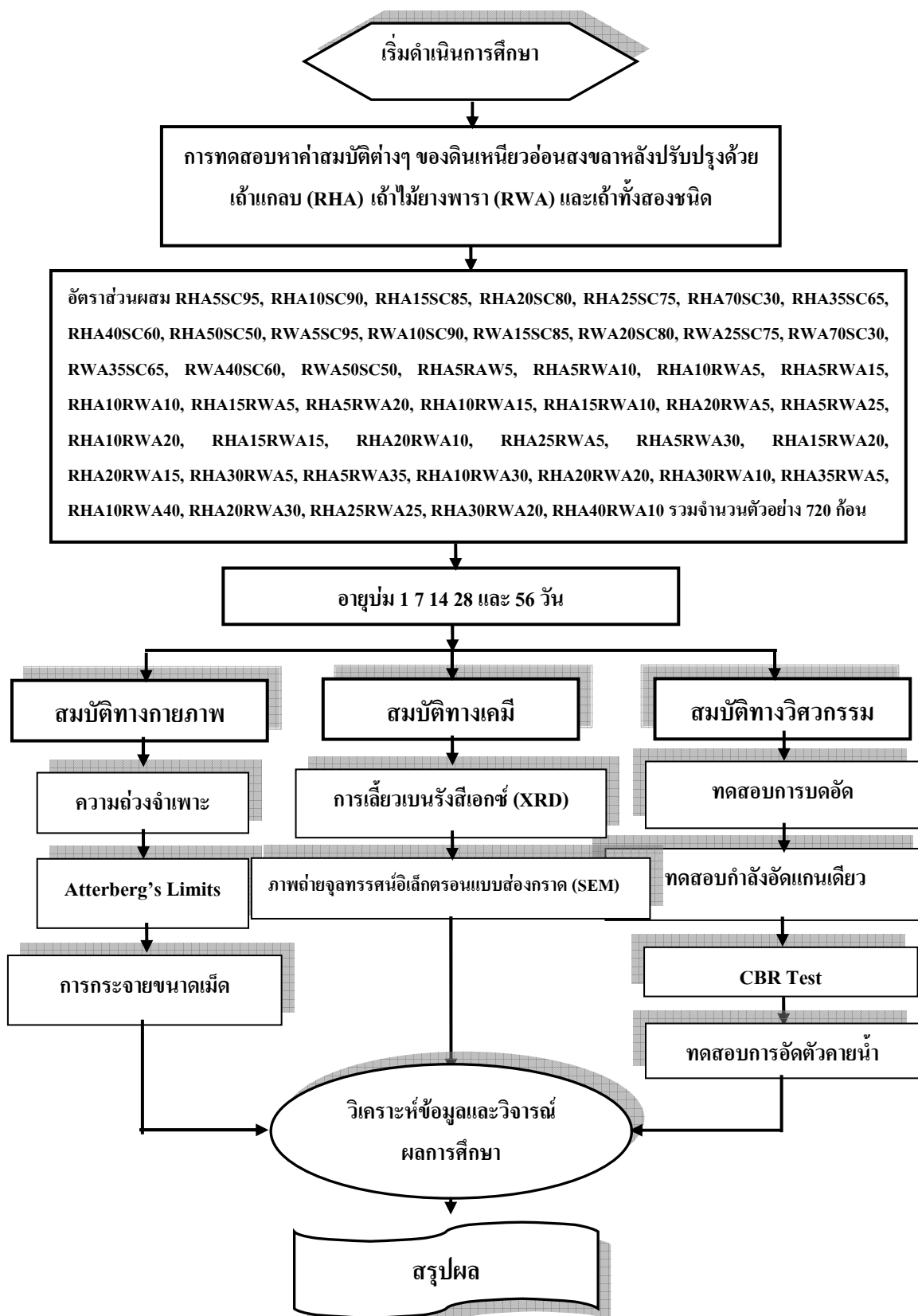
สรุปขั้นตอนการทดสอบและสังเคราะห์ของดินเหนียวอ่อนสงขลาสภาพและเปลี่ยนสภาพโดยการบดอัดดังแสดงในรูปที่ 3.5 ขั้นตอนการทดสอบและสังเคราะห์เถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และสรุปขั้นตอนการทดสอบและสังเคราะห์ของดินเหนียวอ่อนสงขลาที่ปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบ เถ้าไม้ยางพาราและเถ้าทั้งสองชนิดดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทดสอบดินเหนียวอ่อนสงขลาสภาพและเปลี่ยนสภาพ (บดอัด)



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเปลือกไข่และเปลือกไข่พิราบ



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษาดินเหนียวอ่อนสงขลาหลังปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบ เถ้าไม้ยางพาราและเถ้าทั้งสองชนิด

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผลการศึกษา

4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของดินเหนียวอ่อนสงขลา [สภาพเดิม]

ดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นดินชั้นดินเดิม (Subgrade) มีลักษณะเนื้อละเอียด สีเทาปนดำและพบว่าดินมีกลิ่นเน่าเปื่อยรุนแรง ความลึกของดินตัวอย่างในการทำการศึกษาวิจัยอยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 1.5-2.0 เมตร จากผิวดินเดิม ที่บริเวณพื้นที่สวนเฉลิมพระเกียรติ 72 พรรษามหาราชนิ ในเขตเทศบาลนครสงขลา อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา

4.1.1 องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลา

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวสงขลาโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่ามีปริมาณแร่ควอตซ์ (Quartz) เท่ากับ 68.0% แร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite) เท่ากับ 8.0% และแร่อิลไลต์ (Illite) เท่ากับ 24.0% ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของสมมาตร (2550) ว่างค์ประกอบแร่ของดินเหนียวบริเวณสะพานดินสุสานนท์ จังหวัดสงขลา พบว่ามีปริมาณแร่ควอตซ์เป็นหลักและยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของสุขสันต์และรุ่งลาวัลย์ (2550) ได้ใช้วิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เพื่อตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวกรุงเทพฯ พบว่ามีส่วนประกอบของแร่ควอตซ์และแร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่และมีปริมาณ 70%

จากแผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย ปีพ.ศ. 2542 ได้ให้ดินเหนียวกรุงเทพฯและดินเหนียวสงขลาเป็นดินชนิดเดียวกันอยู่หมวดหินยุคควอเทอร์นารี

4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวอ่อนสงขลา

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวอ่อนสงขลาโดยวิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence) พบว่ามีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) เท่ากับ 52.95% และอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เท่ากับ 14.52% เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมกับการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีทางเคมี เนื่องจากสารประสานสามารถทำปฏิกิริยา

ทางเคมีกับซิลิกาในดินและอะลูมินาในดินที่มีอยู่มากในดินได้คือ องค์ประกอบของ Fe_2O_3 เท่ากับ 9.09% K_2O เท่ากับ 1.82% Na_2O เท่ากับ 0% TiO_2 เท่ากับ 1.44% MgO เท่ากับ 0% Cl เท่ากับ 0.52% และ SO_3 เท่ากับ 5.92% สำหรับค่าสูญเสียจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition, LOI) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0% ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของสมมาตร (2550) ได้ศึกษาการปรับปรุงดินคันทางด้วยปูนซีเมนต์ในสงขลาและสตูล ผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวอ่อนสงขลา พบว่าองค์ประกอบหลักทางเคมีประกอบด้วย SiO_2 เท่ากับ 48.69% และ Al_2O_3 เท่ากับ 16.79% ตามลำดับ

4.1.3 สิ่งเจือปนในดินเหนียวอ่อนสงขลา

จากการทดสอบสมบัติทางเคมีของดินเหนียวสงขลา พบว่าจะมีค่า pH เท่ากับ 3.15 ซึ่งแสดงว่าดินมีสภาพเป็นกรดค่อนข้างสูง มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 3.50 ก./กก. สสารอินทรีย์ เท่ากับ 38.99 ก./กก. และซัลเฟตเท่ากับ 2.31 ก./กก. ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของสมมาตร (2550) ได้ตรวจดินอย่างซึ่งเป็นดินเหนียวบริเวณถนนลพบุรีราเมศวร์สงขลา เพื่อหาสิ่งเจือปน ผลพบว่ามีค่า pH เท่ากับ 3.41 และมีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 2.81 ก./กก. ผลดังกล่าวเกิดจากตะกอนดินที่ทับถมกันบริเวณพื้นที่ใกล้ทะเล ซึ่งมีแนวโน้มที่จะส่งผลต่อกำลังของดินหลังจากที่ปรับปรุงคุณภาพให้ลดลง จากการศึกษาของเกษมและโกศล (2544) ได้ศึกษาผลกระทบของดินซีเมนต์ต่อปริมาณของสสารอินทรีย์และคลอไรด์ พบว่าปริมาณของสสารอินทรีย์ ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลงแต่ปริมาณของคลอไรด์ไม่ส่งผลต่อค่ากำลังอัด

4.1.4 สมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนสงขลา

จากการทดสอบดินเหนียวสงขลาพบว่ามีค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (Natural Water Content NWC) มีค่าเท่ากับ 76.44% และค่าพิกัดเหลว (LL) เท่ากับ 53.37% กรณีที่ค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติมากกว่าค่าพิกัดเหลวเป็นช่วงที่ดินมีความแข็งแรงต่ำเนื่องจากดินอยู่ในสภาวะเหลวค่าพิกัดพลาสติก (PL) เท่ากับ 28.36% และค่าดัชนีพลาสติก (PI) เท่ากับ 25.01% ดินเหนียวสงขลามีค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s) เท่ากับ 2.64 จากการแบ่งชนิดของดินตามขนาดของเม็ดดินซึ่งอ้างตามระบบ MIT พบว่ามีปริมาณของทราย (Sand) ขนาด 0.06-2 มม. เท่ากับ 3.00% ดินตะกอน (Silt) ขนาด 0.002-0.06 มม. เท่ากับ 86.40% และปริมาณของดินเหนียว (Clay) ขนาด < 0.002 มม. เท่ากับ 10.60% ดังตารางที่ 4.1 การกระจายขนาดของเม็ดดินเหนียวอ่อนสงขลาได้แสดงไว้ในรูปที่

4.1 จากการจำแนกดินตามระบบเอกภาพ (Unified Soil Classification) ดินเหนียวอ่อนสงขลาจัดอยู่ในประเภท MH

4.1.5 สมบัติทางเชิงกลของดินเหนียวอ่อนสงขลา

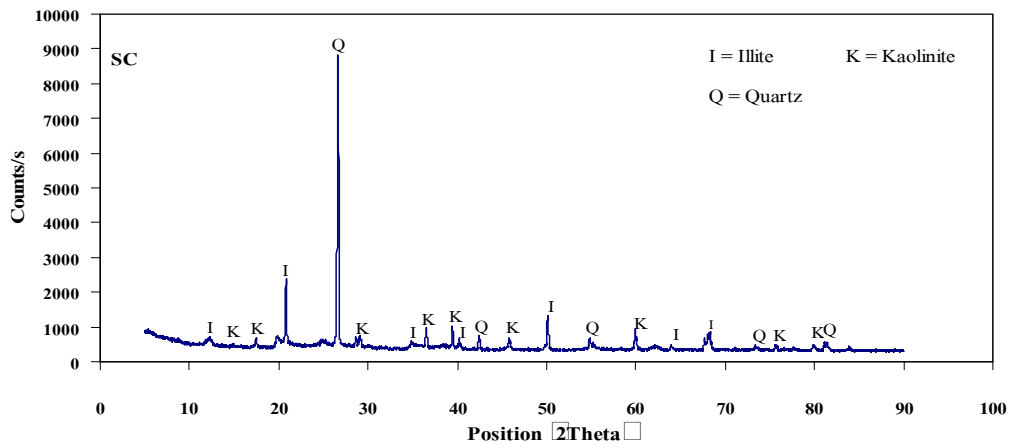
จากการทดสอบสมบัติทางเชิงกลของดินเหนียวสงขลาพบว่าค่าหน่วยน้ำหนักรวม (Total Unit Weight, γ_t) เท่ากับ 1,491 กก./ม³ การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) พบว่าดินเหนียวอ่อนสงขลา มีค่ากำลังอัดก่อนข้างต่ำเท่ากับ 0.16 กก./ม². มีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (E_{50}) เท่ากับ 2.22 กก./ม². และค่าความเครียดที่จุดวิบัติ (Strain at Failure, ϵ_r) เท่ากับ 9.80% ดังตารางที่ 4.1 จากการทดสอบพบว่าดินมีการยุบตัวสูง

4.1.6 การกระจายขนาดของดินเหนียวอ่อนสงขลา เถ้าแกลบ เถ้าไม้ยางพาราและดินเหนียวสงขลาหลังปรับปรุงด้วยสูตร RHA20RWA30

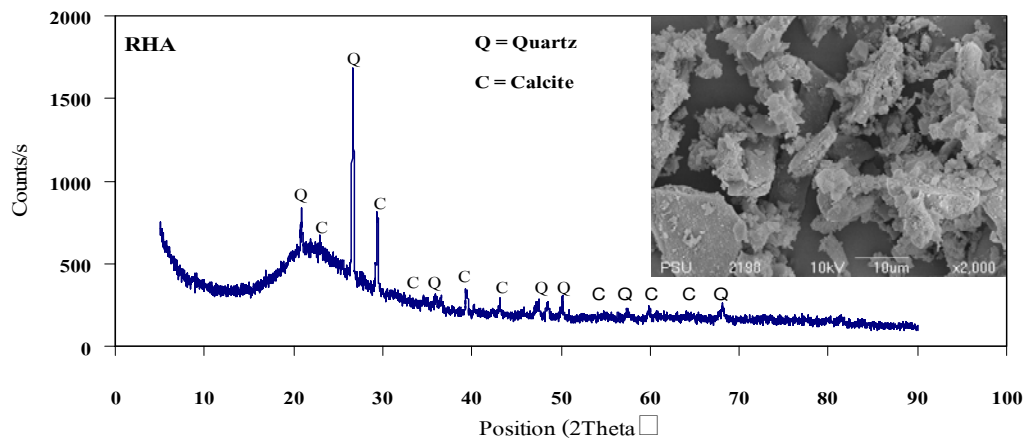
จากการวิเคราะห์เส้นกราฟการกระจายขนาดเม็ดของดินเหนียวสงขลา เถ้าแกลบ เถ้าไม้ยางพาราและกรณีหลังปรับปรุงด้วยสูตร เถ้าแกลบ 20% และเถ้าไม้ยางพารา 30% หรือ RHA20RWA30 ซึ่งปรากฏว่าเส้นกราฟของดินเหนียวสงขลาแสดงถึงขนาดคละกันไม่ดี จากผลของค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นกราฟคือ $C_u = 10 > 6$ แต่ค่า $C_c = 0.8 < 1$ เมื่อผสมด้วยเถ้าแกลบ 20% และเถ้าไม้ยางพารา 30% เข้าไปในดินเหนียวสงขลาที่มีขนาดคละกันไม่ดี ปรากฏว่าเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน ส่งผลให้เส้นกราฟแสดงผลของดินหลังปรับปรุงมีลักษณะขนาดของมวลรวมเป็นลักษณะที่มีขนาดคละที่ดี จากผลการหาค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นกราฟคือ $C_u = 6.3 > 6$ และ $C_c = 2.96$ อยู่ระหว่าง 1-3 ดังในรูปที่ 4.2 ซึ่งต่างกับผลการศึกษาของดิษฐพร (2551) ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของดินเหนียวปากพนังด้วยเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา พบว่าเมื่อผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน 10% และเถ้าไม้ยางพารา 10% ส่งผลให้เส้นกราฟการกระจายขนาดของมวลรวมเป็นเส้นเส้นตรงที่เอียงๆ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความโค้งของกราฟดังนี้ $C_u = 11.11 > 6$ แต่ค่า $C_c = 0.3 < 1$ ซึ่งเป็นดินตัวอย่างที่มีขนาดคละกันไม่ดี

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางเชิงกลและสิ่งเจือปนของดินเหนียวสงขลา

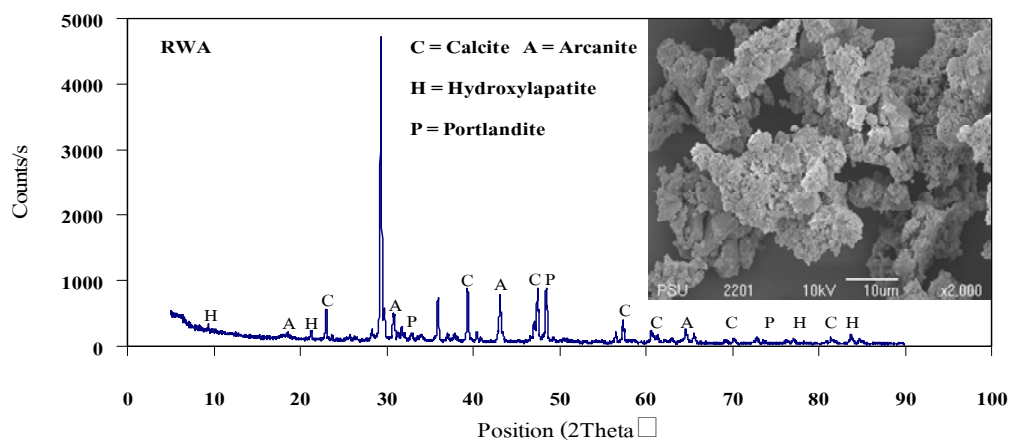
สมบัติทางกายภาพ ทางเชิงกลและสิ่งเจือปนของดินเหนียวสงขลา	ค่าแสดงหรือปริมาณ
1 สมบัติทางกายภาพ	
ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (NWC \square)	76.44%
พิกัดเหลว (LL \square)	53.37%
พิกัดพลาสติก (PL \square)	28.36%
ดัชนีพลาสติก (PI \square)	25.01%
ความถ่วงจำเพาะ (Gs \square)	2.64
ปริมาณของดินที่ลอดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 (0.075 มม. \square)	98.84
การกระจายขนาด (ตามระบบ MIT \square)	
ทราย (Sand \square ขนาด 0.06-2 มม.)	3%
ดินตะกอน (Silt \square ขนาด 0.002-0.06 มม.)	86.40%
ดินเหนียว (Clay \square ขนาด <0.002 มม.)	10.6%
ประเภทของดินตามระบบเอกภาพ (Unified Soil Classification \square)	MH
2 สมบัติทางเชิงกล	
หน่วยน้ำหนักรวม (γ_t \square กก./ม. ³ \square)	1.491
กำลังอัดแกนเดี่ยว (UCS \square กก./ซม. ² \square)	0.16
โมดูลัสของความยืดหยุ่น (E_{50} \square กก./ซม. ² \square)	2.29
ความเครียดที่จุดวิบัติ (ϵ_r \square % \square)	9.80
3 สิ่งเจือปน	
ความเป็นกรดและด่าง (pH \square กก./กก. \square)	3.15
คลอไรด์ (Chloride \square กก./กก. \square)	3.50
สสารอินทรีย์ (Organic Matter \square กก./กก. \square)	38.99
ซัลเฟต (Sulphate \square กก./กก. \square)	2.31



ก



ข

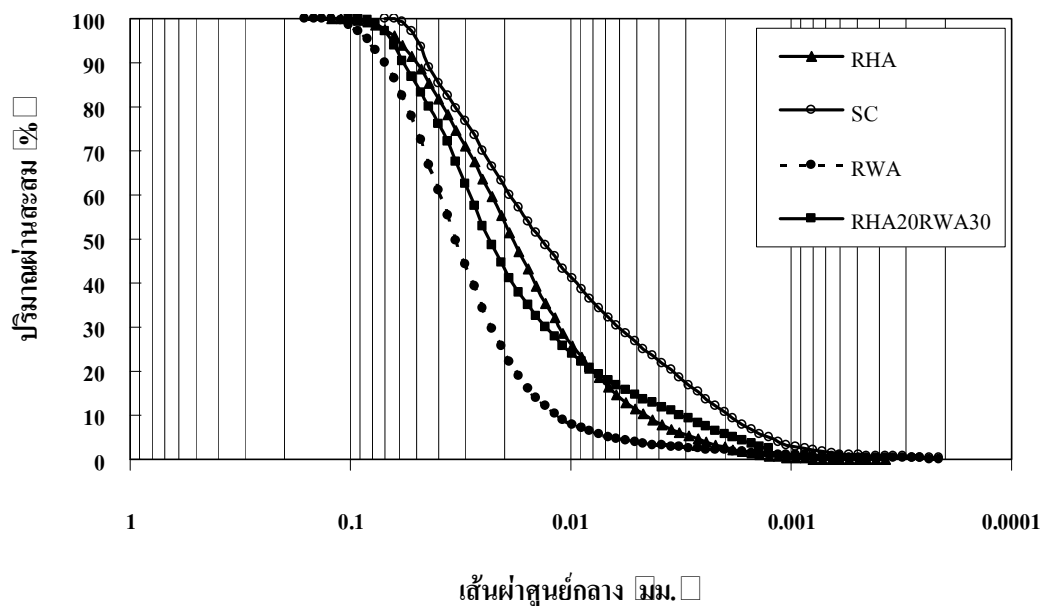


ค

รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบแร่ กดินเหนียวสงขลา (SC) ขเถ้าถ่านกลบ (RHA) และ คเถ้าไม้อยางพารา (RWA)

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวสงขลา (SC) ฟ้าเกลบ (RHA) และเถ้าไม้ยางพารา (RWA)

องค์ประกอบ	SC (%)	RHA (%)	RWA (%)
MgO	-	0.35	3.43
Al ₂ O ₃	14.52	1.34	0.08
SiO ₂	52.95	86.45	0.87
P ₂ O ₅	-	0.85	1.73
SO ₃	5.92	0.47	5.57
Cl	0.52	0.20	0.77
K ₂ O	1.82	1.06	12.45
CaO	0.18	2.11	45.01
TiO ₂	1.44	0.12	-
MnO ₂	-	0.44	1.08
Fe ₂ O ₃	9.09	1.38	0.20
SrO	-	-	0.14
CuO	0.04	0.08	0.19
Na ₂ O	0.02	0.02	0.08
LOI	-	5.13	28.58



รูปที่ 4.2 ผลการกระจายขนาดเม็ดของดินเหนียวสงขลา (SC) เถ้าแกลบ (RHA) เถ้าไม้ยางพารา (RWA) และหลังผสมด้วยสูตร RHA20RWA30

4.2 ผลการหาค่าสมบัติของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา

4.2.1 สมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา

จากการทดสอบเถ้าแกลบพบว่าค่าปริมาณน้ำตามธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 5.02% และค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.41 จากการแบ่งชนิดของดินตามขนาดของเม็ดดิน ซึ่งอ้างอิงตามระบบ MIT พบว่ามีปริมาณเทียบเท่ากับทราย (Sand) ขนาด 0.06-2 มม. เท่ากับ 20.45% เทียบเท่ากับดินทรายแป้ง (Silt) ขนาด 0.002-0.06 มม. เท่ากับ 71.82% และปริมาณเทียบเท่ากับดินเหนียว ขนาด < 0.002 มม. เท่ากับ 7.73% ดังตารางที่ 4.3 การกระจายขนาดเม็ดของเถ้าแกลบดังรูปที่ 4.1

จากการทดสอบเถ้าไม้ยางพาราพบว่าค่าปริมาณน้ำตามธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 2.39% และค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.86 จากการแบ่งชนิดของดินตามขนาดของเม็ดดินซึ่งอ้างอิงตามระบบ MIT พบว่ามีปริมาณเทียบเท่ากับทราย (Sand) ขนาด 0.06-2 มม. เท่ากับ 14.50% เทียบเท่ากับดินตะกอน (Silt) ขนาด 0.002-0.06 มม. เท่ากับ 78.44% และปริมาณเทียบเท่ากับดินเหนียวขนาด < 0.002 มม. เท่ากับ 7.06% ดังตารางที่ 4.3 การกระจายขนาดเม็ดของเถ้าไม้ยางพาราดังรูปที่ 4.1 ค

เมื่อพิจารณาการกระจายขนาดเม็ดของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา พบว่ามีการกระจายขนาดที่ใกล้เคียงกันมากซึ่งอยู่ในช่วง 0.008-0.6 มม.

ตารางที่ 4.3 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา

สมบัติทางกายภาพ	ค่าแสดงหรือปริมาณ	
	เถ้าแกลบ	เถ้าไม้ยางพารา
ปริมาณน้ำตามธรรมชาติ (NWC) %	5.02	2.39
ความถ่วงจำเพาะ (Gs)	2.41	2.86
การกระจายขนาดของเม็ด		
ขนาด 0.06-2 มม.	20.45%	14.50%
ขนาด 0.002-0.06 มม.	71.82%	78.44%
ขนาด <0.002 มม.	7.73%	17.06%
พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) (ตร.ม./ก.)	37.628	4.535
ความพรุน (Porosity)	0.00186	0.00019

4.2.2 องค์ประกอบแร่ของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา

จากการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของเถ้าแกลบโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่ามีปริมาณแร่ควอตซ์เท่ากับ 73% และแร่แคลไซต์เท่ากับ 27% ดังในรูปที่ 4.1 ข ส่วนองค์ประกอบแร่ของเถ้าไม้ยางพาราโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่ามีปริมาณแร่แคลไซต์เท่ากับ 76.80% แร่อานแคนไทต์ (Arcanthisite) เท่ากับ 14.10% แร่พอร์ตแลนด์ (Portlandite) เท่ากับ 1.0% และแร่ไฮดรอกซิลลาพาไทต์ (Hydroxylapatite) เท่ากับ 0.1% ดังในรูปที่ 4.1 ค ซึ่งแสดงว่าเถ้าทั้งสองยังไม่ได้เป็นสารอสังฐานอย่างแท้จริง

4.2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของเถ้าแกลบ โดยวิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence) ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์แร่ในดิน พบว่ามีองค์ประกอบของ SiO₂ เท่ากับ 86.45% CaO เท่ากับ 2.11% SO₃ เท่ากับ 0.47% Al₂O₃ เท่ากับ 1.34% Cl เท่ากับ

0.20% TiO_2 เท่ากับ 0.12% และ MnO_2 เท่ากับ 0.44% สำหรับผลการทดสอบน้ำหนักที่สูญหายหลังเผา (Loss on Ignition, LOI) พบว่ามีค่าสูญเสียจากการเผาไหม้เท่ากับ 5.13% ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Murty and Praveen (2008) ผลการตรวจแก้แกลบที่ใช้ในงานวิจัยพบว่ามีซิลิกาเท่ากับ 89.32% อะลูมินาเท่ากับ 2.73% เหล็กออกไซด์เท่ากับ 0.81% และแคลเซียมออกไซด์เท่ากับ 4.22% ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับของ Sharma et al. (2008) ได้กล่าวถึงผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแกลบ พบว่ามีองค์ประกอบคือ SiO_2 เท่ากับ 90% รองลงมาเป็น CaO เท่ากับ 4.50% และ Al_2O_3 เท่ากับ 2.50% ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแกลบไม้ยางพารา โดยวิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ พบว่ามีองค์ประกอบของ CaO เท่ากับ 45.01% K_2O เท่ากับ 12.45% MgO เท่ากับ 3.43% P_2O_5 เท่ากับ 1.73% MnO_2 เท่ากับ 1.08% SO_3 เท่ากับ 5.57% Fe_2O_3 เท่ากับ 0.20% Al_2O_3 เท่ากับ 0.08% SrO เท่ากับ 0.14% และ Cl เท่ากับ 0.77% สำหรับการทดสอบ Loss on Ignition (LOI) พบว่ามีค่าสูญเสียจากการเผาไหม้เท่ากับ 28.58% ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ดนุพลและจิรชาติ (2543) ซึ่งได้วิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของแกลบไม้ยางพารา พบว่ามี CaO เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับ 58.17% รองลงมา คือ K_2O เท่ากับ 13.68%

ส่วนแกลบมีองค์ประกอบของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับ 89.17% มีปริมาณ SO_3 เท่ากับ 0.47% โดยไม่พบ Na_2O และค่า Loss on Ignition (LOI) เท่ากับ 5.13% เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618 พบว่าสามารถจัดเป็นสารปอซโซลาน Class N ดังแสดงในตารางที่ 4.4

แกลบไม้ยางพารา (RWA) มีองค์ประกอบของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับ 1.15% มีปริมาณ SO_3 เท่ากับ 5.57% โดยไม่พบ Na_2O และค่า Loss on Ignition (LOI) เท่ากับ 28.58% เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618 พบว่าไม่สามารถจัดเป็นสารปอซโซลานได้ดังแสดงในตารางที่ 4.4 แต่มีปริมาณของ CaO เท่ากับ 45.01% ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณของ CaO ในปูนซีเมนต์จึงมีความสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชันเหมือนกับปูนซีเมนต์ได้ ส่วนการที่มีค่า LOI ที่สูงเนื่องจากการเผาในระบบเปิดจึงยังคงมีสารอินทรีย์อยู่มาก ซึ่งอาจส่งผลหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันและทำให้ปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์

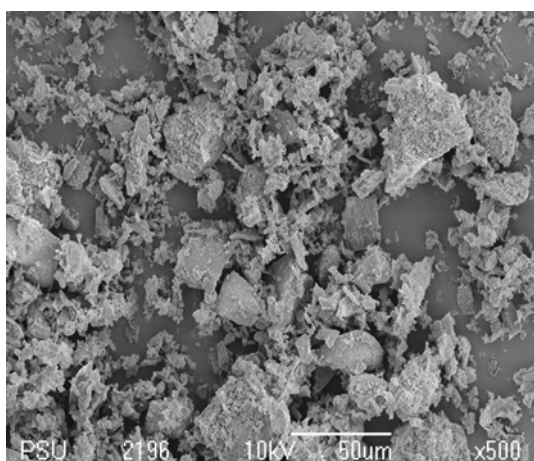
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบสมบัติปอซโซลานของเถ้าแกลบ (RHA) และเถ้าไม้ยางพารา (RWA) กับมาตรฐาน ASTM C 618

องค์ประกอบ	Class C	Class F	Class N	RHA	RWA
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ไม่น้อยกว่า (%)	50	70	70	89.17	1.15
SO_3 ไม่เกิน (%)	5.0	5.0	4.00	0.47	5.57
Na_2O_3 ไม่เกิน (%)	1.5	1.5	1.50	-	-
LOI ไม่เกิน (%)	6.0	12.0	10.00	5.13	28.58

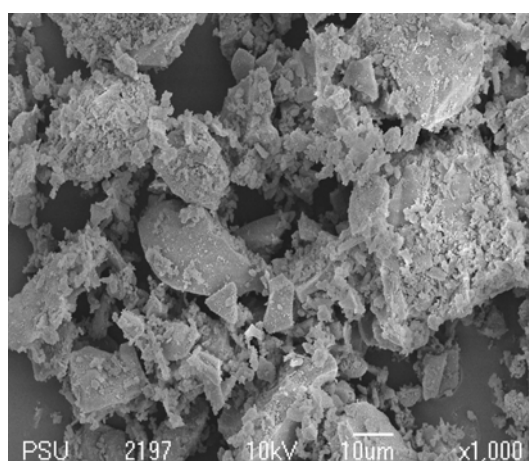
4.2.4 โครงสร้างจุลภาคของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา

จากการตรวจโครงสร้างจุลภาคของเถ้าแกลบโดยภาพถ่ายจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังในรูปที่ 4.3 พบว่าอนุภาคของเถ้าแกลบมีลักษณะส่วนใหญ่เป็นแผ่นเหมือนผลึกโพมไซ ฝิวเรียบ แต่บางส่วนพบว่ามีรูปร่างภายนอกไม่แน่นอนหรือเป็นรูปเหลี่ยม ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะช่วยหล่อลื่นทำให้การบดอัดง่ายขึ้น

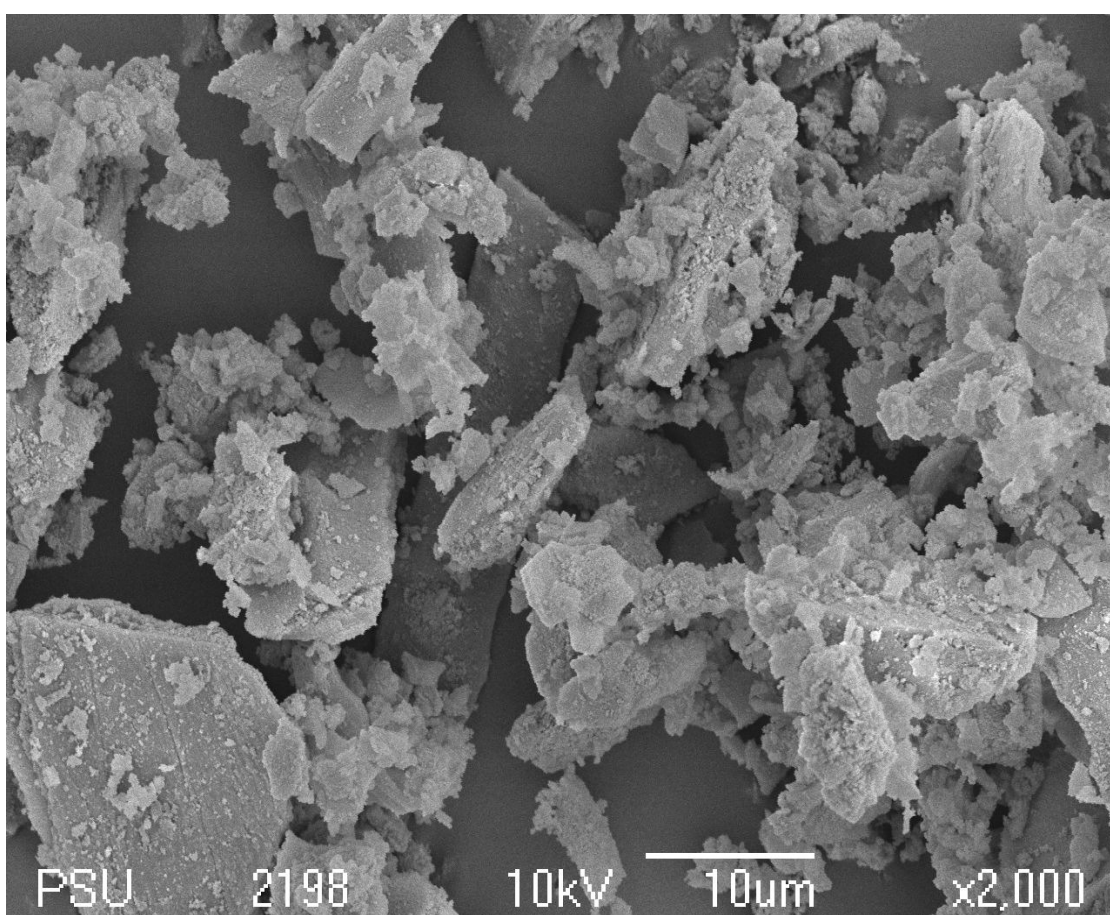
ส่วนโครงสร้างจุลภาคของเถ้าไม้ยางพาราดังในรูปที่ 4.4 พบว่าอนุภาคของเถ้าไม้ยางพาราเป็นเหลี่ยมภายในมีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไป ซึ่งลักษณะที่มีเหลี่ยมคมมากอาจส่งผลเสียทำให้การบดอัดยากขึ้นและไม่เกื้อหนุนต่อการทำปฏิกิริยากับแร่ในดินเหนียวอ่อนสงขลา แต่ส่งผลให้การยึดเกาะแบบขัดประสานกัน (Mechanical Interlock) ดียิ่งขึ้นเนื่องจากมีเหลี่ยมคมมากและขณะเดียวกันก็ดูดซึมน้ำมากเข้าไปในรูพรุนของตัวเองทำให้ปริมาณน้ำในมวลดินที่ผสมลดลงไปด้วย



ก □

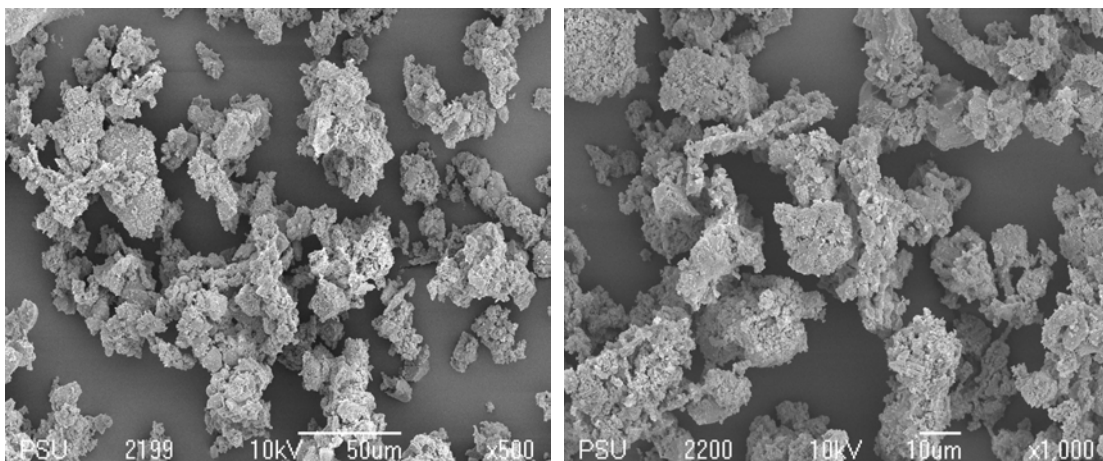


ข □



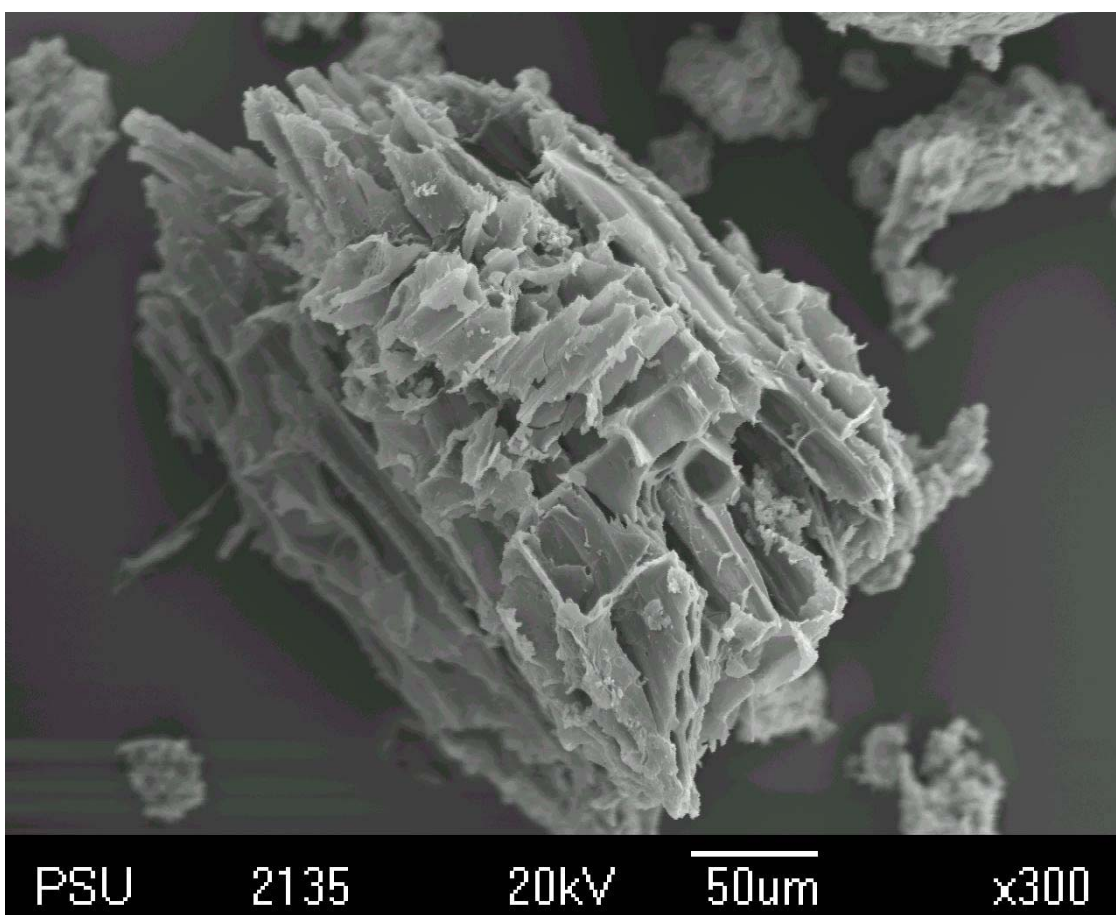
ค □

รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของถั่วแกลบ ก □ กำลังขยาย 500 เท่า ข □ กำลังขยาย 1000 เท่าและ ค □ กำลังขยาย 2000 เท่า



ก □

ข □



ค □

รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของใยไหมยางพารา ก □ ถัดข้างขยาย 500 เท่า ข □ ถัดข้างขยาย 1000 เท่า และ ค □ ถัดข้างขยาย 300 เท่า

4.3 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของดินเหนียวอ่อนสงขลาหลังปรับปรุง

4.3.1 สมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนสงขลาหลังปรับปรุง

1 □ ความถ่วงจำเพาะ

จากการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s) พบว่าดินเหนียวสงขลา มีค่าเท่ากับ 2.64 เถ้าแกลบมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.41 เถ้าไม้ยางพารามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.86 และค่าความถ่วงจำเพาะกรณีของดินเหนียวอ่อนสงขลาหลังจากปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา ทั้งที่ผสมเถ้าเพียงชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงเดียวและเถ้าทั้งสองชนิดตั้งค่าในตารางที่ 4.5

ค่าความถ่วงจำเพาะของดินเหนียวสงขลาหลังจากปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา เมื่อคำนึงถึงอิทธิพลของเถ้าแกลบแทนที่เพียงชนิดเดียว พบว่าเมื่อปริมาณเถ้าแกลบแทนที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น และหากพิจารณาอิทธิพลของเถ้าแกลบแทนที่ในปริมาณที่เท่ากันและมากกว่าเถ้าไม้ยางพารา พบว่าการผสมเถ้าแกลบแทนที่ในปริมาณที่เท่ากันและมากกว่าเถ้าไม้ยางพารา ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับการผสมเถ้าแกลบแทนที่เพียงอย่างเดียวดังในรูปที่ 4.5

ค่าความถ่วงจำเพาะของดินเหนียวสงขลาหลังจากปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าไม้ยางพาราแทนที่เพียงชนิดเดียว พบว่าการผสมเถ้าไม้ยางพาราที่ 5% แรกของการแทนที่ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้าไม้ยางพาราแทนที่มากขึ้นกลับส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของเถ้าไม้ยางพาราที่เพิ่มขึ้น และกรณีพิจารณาอิทธิพลของเถ้าไม้ยางพาราแทนที่ในปริมาณที่เท่ากันและมากกว่าเถ้าแกลบ พบว่าเมื่อผสมเถ้าไม้ยางพาราในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าไม้ยางพาราที่เพิ่มมากขึ้นทำนองเดียวกันกับการผสมเถ้าไม้ยางพาราเพียงอย่างเดียว ดังรูปที่ 4.6

2 □ พฤติกรรมของพิกัดแอสเทอร์เบิร์ก

จากการทดสอบหาค่าพิกัดแอสเทอร์เบิร์ก พบว่าดินเหนียวสงขลา มีค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit □ เท่ากับ 53.37% ค่าพิกัดพลาสติก (Plastic Limit □ เท่ากับ 28.36% และค่าดัชนีพลาสติก (Plastic Index □ เท่ากับ 25.01% สำหรับเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารามีค่าไม่เป็นพลาสติก (Non-Plastic □ พฤติกรรมแอสเทอร์เบิร์กของดินเหนียวสงขลาหลังผสมเถ้าทั้งสองชนิดได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5

สำหรับความชื้นเหลือของดินเหนียวสงขลาหลังจากผสมด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าแกลบโดยการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบเพียงอย่างเดียวจากอัตราส่วน 5-50% พบว่า การผสมเถ้าแกลบส่งผลให้ค่าพิกัดเหลวลดลงและส่งผลให้ค่าพิกัดพลาสติกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จึงทำให้ค่าดัชนีพลาสติกลดลงและเมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าทั้งสองชนิดจากอัตราส่วน 10-50% โดยที่พิจารณาปริมาณของเถ้าแกลบแทนที่ในปริมาณที่น้อยกว่า เท่ากันและมากกว่าเถ้าไม้ยางพารา พบว่าเมื่อผสมเถ้าแกลบในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าพิกัดเหลวเพิ่มขึ้นและยังทำให้ค่าพิกัดพลาสติกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จึงทำให้ค่าดัชนีพลาสติกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับดินเดิม ค่าดัชนีพลาสติกลดลงเท่ากับ 31.1% ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.7

ซึ่งค่าพิกัดแอดเทอร์เบอร์ก ภูมิของดินเหนียวอ่อนสงขลาหลังจากผสมด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา เมื่อมีการพิจารณาอิทธิพลของเถ้าไม้ยางพาราโดยการแทนที่เถ้าไม้ยางพาราเพียงอย่างเดียว พบว่าการผสมเถ้าไม้ยางพาราในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าพิกัดเหลวเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ค่าพิกัดพลาสติกลดลงเล็กน้อย จึงทำให้ค่าดัชนีพลาสติกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอย่างต่อเนื่องจากการผสมเถ้าไม้ยางพาราที่ 5-50% แต่เมื่อเปรียบเทียบกับดินเดิมค่าดัชนีพลาสติกลดลงเท่ากับ 32.43% และกรณีพิจารณาอิทธิพลของเถ้าทั้งสองชนิดผสมในอัตราส่วนตั้งแต่ 10-50% โดยพิจารณาที่ปริมาณเถ้าไม้ยางพาราแทนที่น้อยกว่า เท่ากันและมากกว่าเถ้าแกลบ พบว่าการผสมเถ้าไม้ยางพาราในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าพิกัดเหลวลดลงและยังส่งผลให้ค่าพิกัดพลาสติกลดลงเล็กน้อย จึงทำให้ค่าดัชนีพลาสติกลดลงเล็กน้อยอย่างต่อเนื่องดังแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.8 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Redus (1958) ได้ทดสอบค่าพิกัดแอดเทอร์เบอร์ก ดินซีเมนต์ที่ใช้เป็นพื้นทางของสนามบิน พบว่าซีเมนต์จะทำให้เกิดการลดลงของค่าดัชนีพลาสติกของวัสดุและการลดลงจะเป็น ไปอย่างถาวร โดยการลดลงจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณปูนซีเมนต์ และยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Awal (1979) อธิบายเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพดัชนีพลาสติกของดินผสมซีเมนต์ที่เป็นผลมาจากการผสมปูนซีเมนต์ พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์จะมีผลทำให้ดินมีการเพิ่มค่าพิกัดเหลวเล็กน้อยแต่จะทำให้มีการลดลงของค่าพิกัดเหลวและเป็นผลทำให้ค่าสภาพดัชนีพลาสติกมีค่าลดลง นอกจากนี้ Koliyas et al. (2005) ได้อธิบายผลของค่าสภาพดัชนีพลาสติก (PI) ของดิน 2 ชนิด พบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ค่า PI ลดลง

Sariosseiri and Muhunthan (2009) กล่าวถึงผลกระทบของค่าดัชนีพลาสติก จากการศึกษารับปรุงดินเหนียว ด้วยการผสมปูนซีเมนต์ พบว่าค่าดัชนีพลาสติกมีค่าลดลงประมาณ 10% 11.5% และ 13% เมื่อผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น

ศิษุพร (2551) ศึกษาวิจัยการปรับปรุงดินเหนียวปากพางด้วยเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา พบว่าการเพิ่มปริมาณของเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา ส่งผลให้ค่า PI

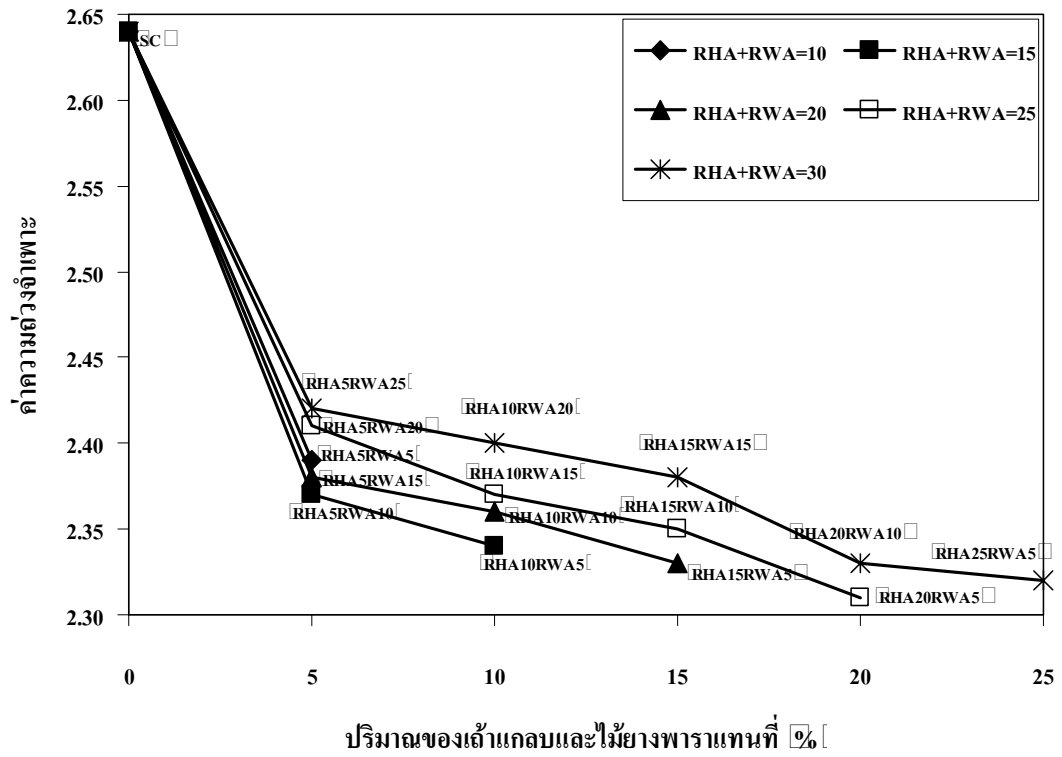
ลดลง และผลการศึกษาของ Basha et al. (2003) กล่าวถึงผลกระทบต่อค่าสภาพพลาสติกและการบดอัด โดยการศึกษาการปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบซึ่งนำมาผสมในดิน 3 ชนิด พบว่าการเพิ่มปริมาณของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ ส่งผลให้ค่าดัชนีพลาสติกลดลง

ตารางที่ 4.5 พฤติกรรมทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนสงขลา ก่อนและหลังจากปรับปรุง

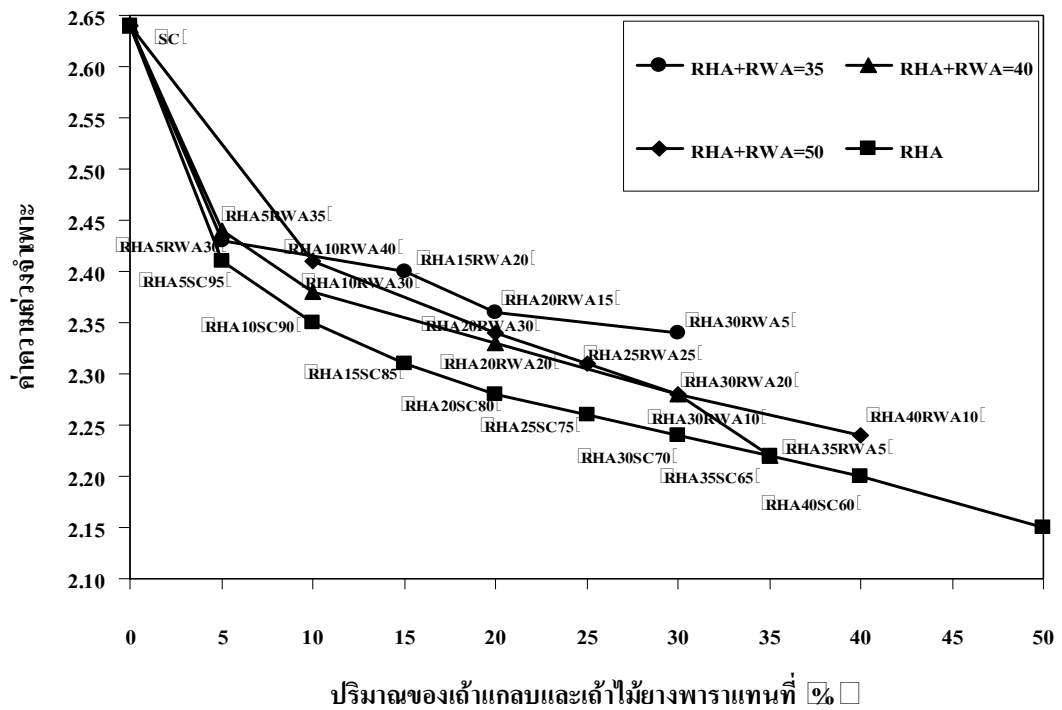
สัญลักษณ์	ความถ่วงจำเพาะ	ค่าพิกัดแอดเทอร์เบิร์ก		
		ค่าพิกัดเหลว % □	ค่าพิกัดพลาสติก % □	ค่าดัชนีพลาสติก % □
SC	2.64	53.37	28.36	25.01
RHA5	2.41	52.42	31.84	20.58
RHA10	2.35	52.11	32.28	19.83
RHA15	2.31	51.84	33.19	18.65
RHA20	2.28	51.61	35.15	16.46
RHA25	2.26	51.33	37.31	14.02
RHA30	2.24	51.20	39.36	11.84
RHA35	2.22	50.85	41.32	9.53
RHA40	2.20	50.61	42.24	8.37
RHA50	2.15	50.19	43.26	6.93
RWA5	2.34	44.69	32.00	12.69
RWA10	2.36	44.83	31.74	13.09
RWA15	2.37	44.98	31.44	13.54
RWA20	2.39	45.11	31.02	14.09
RWA25	2.42	45.28	30.66	14.62
RWA30	2.44	45.43	30.06	15.37
RWA35	2.45	45.62	29.81	15.81
RWA40	2.47	45.86	29.69	16.17
RWA50	2.51	45.95	29.05	16.90
RHA5RWA5	2.39	51.29	42.00	9.29
RHA5RWA10	2.37	50.94	41.61	9.33
RHA10RWA5	2.34	51.44	41.84	9.60

ตารางที่ 4.5 พฤติกรรมทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนสงขลา ก่อนและหลังจากปรับปรุง (ต่อ □)

สัญลักษณ์	ความถ่วงจำเพาะ	ค่าพิกัดแอมเตอร์เบิร์ก		
		ค่าพิกัดเหลว % □	ค่าพิกัดพลาสติก % □	ค่าดัชนีพลาสติก % □
RHA5RWA15	2.38	48.46	38.78	9.68
RHA10RWA10	2.36	49.39	37.73	11.66
RHA15RWA5	2.33	50.81	38.11	12.70
RHA5RWA20	2.41	49.69	37.51	12.18
RHA10RWA15	2.37	49.91	37.64	12.27
RHA15RWA10	2.35	50.44	37.91	12.53
RHA20RWA5	2.31	51.67	38.15	13.52
RHA5RWA25	2.42	47.36	35.37	11.99
RHA10RWA20	2.40	48.19	35.56	12.63
RHA15RWA15	2.38	49.01	36.03	12.98
RHA20RWA10	2.33	49.75	36.27	13.48
RHA25RWA5	2.32	51.46	37.96	13.50
RHA5RWA30	2.43	47.11	34.14	12.97
RHA15RWA20	2.40	47.62	34.54	13.08
RHA20RWA15	2.36	49.11	35.01	14.01
RHA30RWA5	2.34	50.66	35.47	15.19
RHA5RWA35	2.44	46.42	32.62	13.80
RHA10RWA30	2.38	47.65	33.33	14.32
RHA20RWA20	2.33	50.01	35.09	14.92
RHA30RWA10	2.28	50.92	35.88	15.04
RHA35RWA5	2.22	52.52	37.12	15.40
RHA10RWA40	2.41	45.53	29.76	15.77
RHA20RWA30	2.34	49.90	33.46	16.44
RHA25RWA25	2.31	51.74	34.94	16.80
RHA30RWA20	2.28	55.02	37.84	17.18
RHA40RWA10	2.24	55.69	38.45	17.24

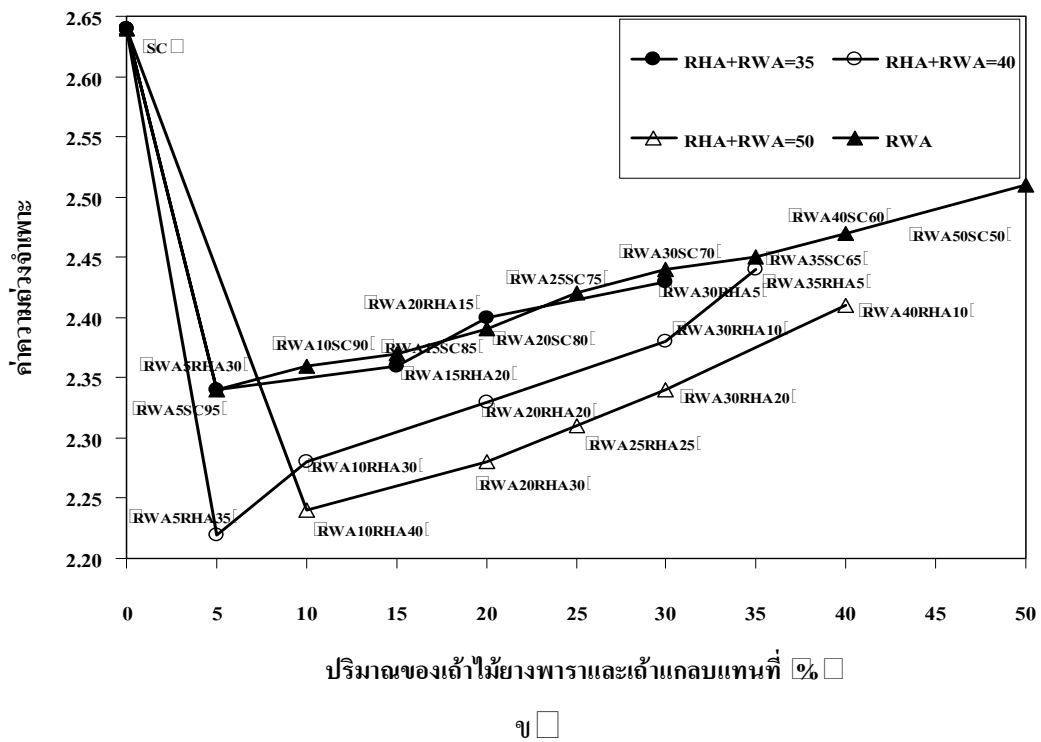
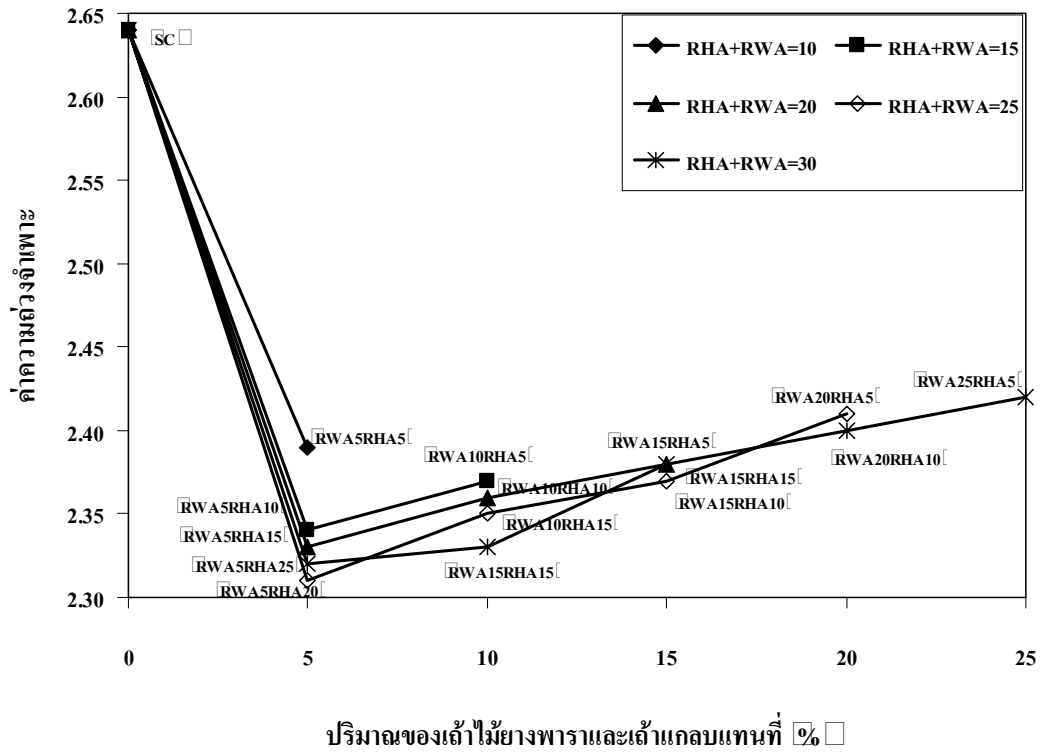


ก □

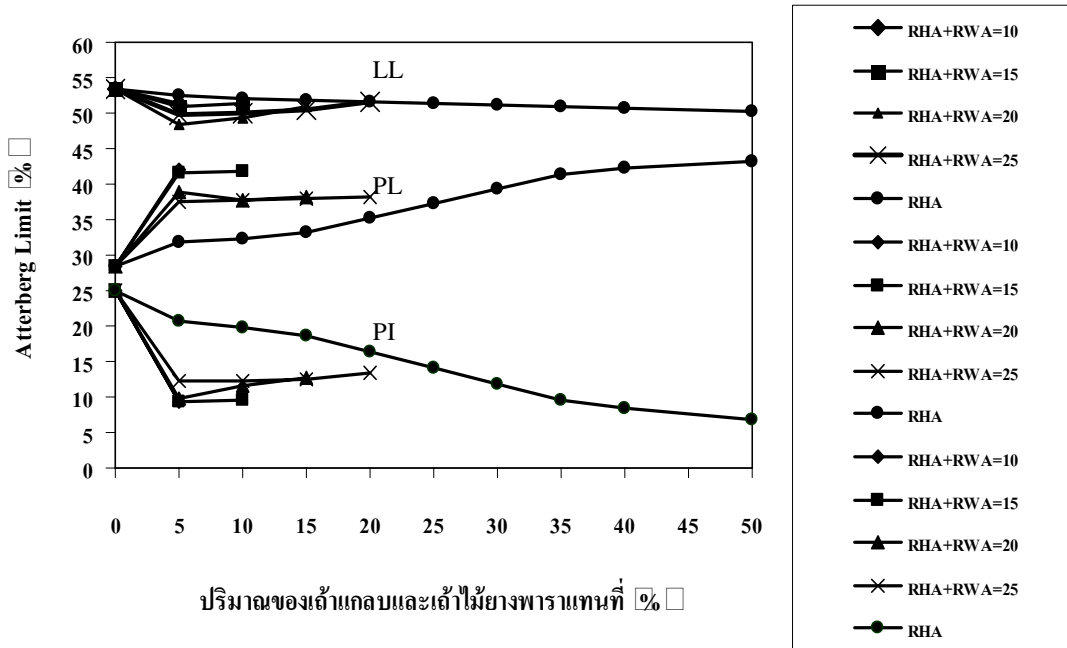


ข □

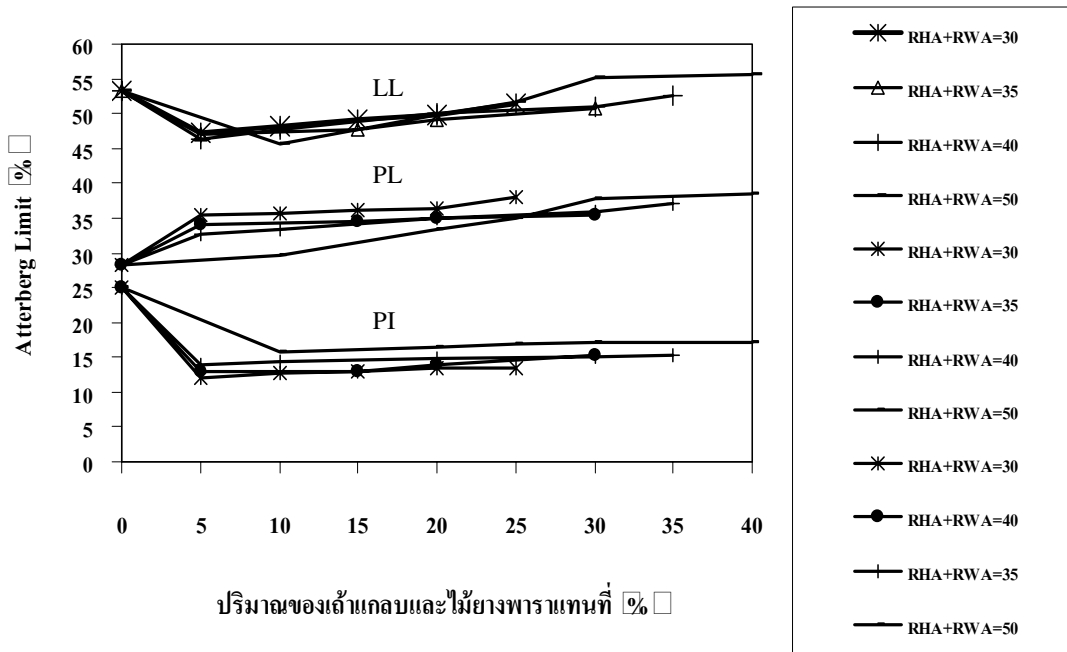
รูปที่ 4.5 พฤติกรรมทางกายภาพของค่าความถ่วงจำเพาะกับปริมาณของเถ้าแทนที่ ก □ RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข □ RHA+RWA 30-50%



รูปที่ 4.6 พฤติกรรมทางกายภาพของค่าความถ่วงจำเพาะกับปริมาณของเจ้าแทนที่ ก □ RWA 10-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข □ RWA+RHA 30-50%

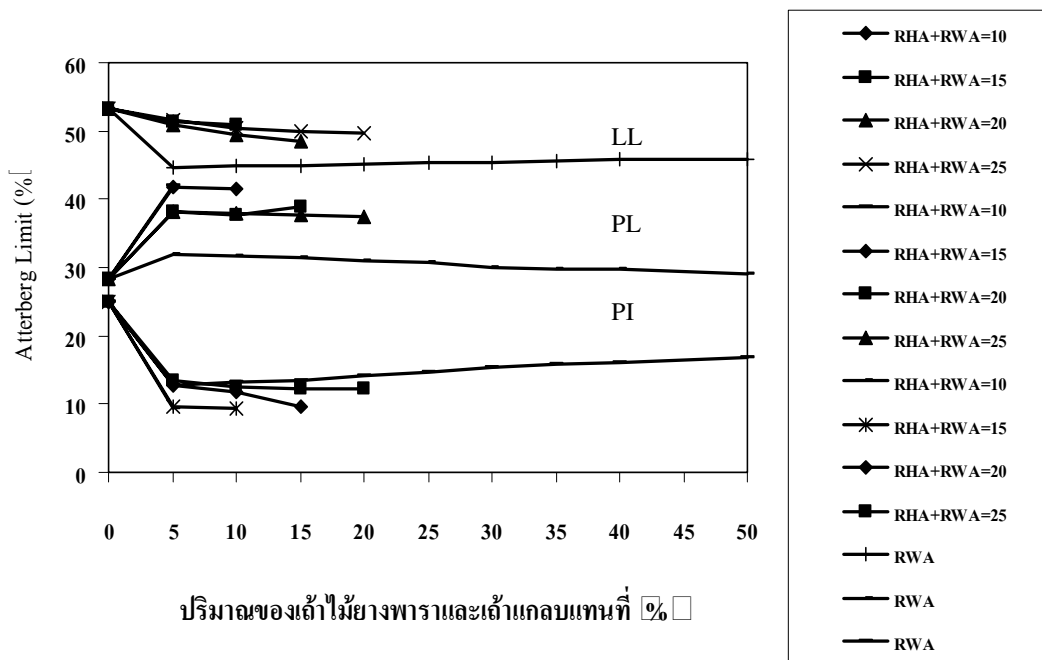


ก □

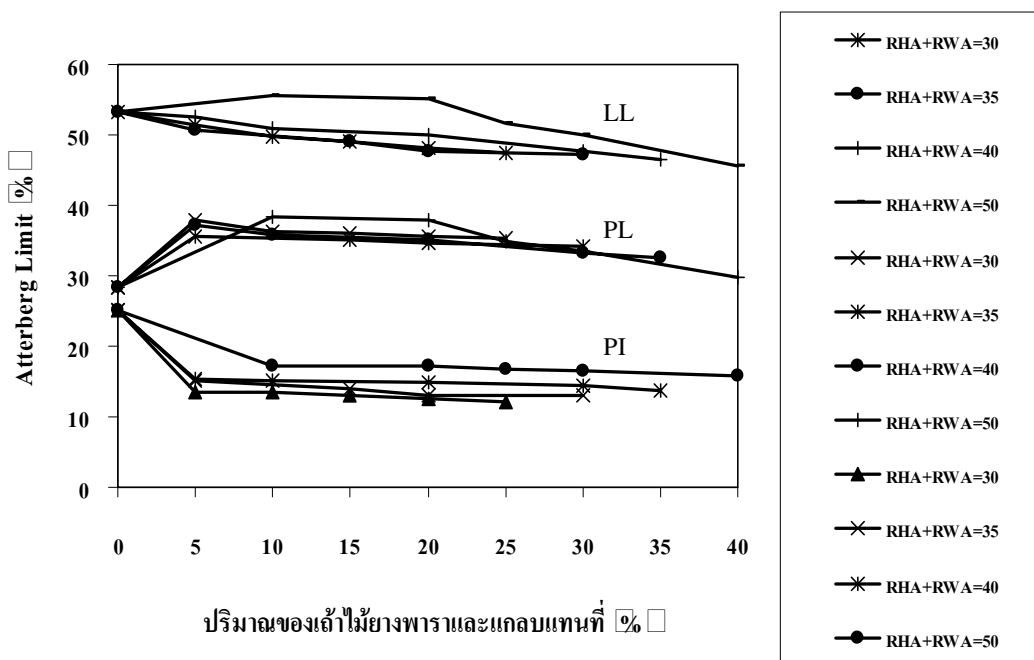


ข □

รูปที่ 4.7 พฤติกรรมทางกายภาพของค่าพิกัดแอดเทอร์เบิร์กกับปริมาณเถ้าแทนที่ ก □RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข □RHA+RWA 30-50%



ก □



ข □

รูปที่ 4.8 พฤติกรรมทางกายภาพของค่าพิกัดแอดเทอร์เบิร์กกับปริมาณเถ้าแทนที่ ก □RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข □RWA+RHA 30-50%

4.3.2 ผลการบดอัดของดินเหนียวสงขลาและกรณีหลังปรับปรุง

จากการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) พบว่าดินเหนียวสงขลา (SC) มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (γ_d) เท่ากับ 1,510 กก./ม.³ และปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) เท่ากับ 26.78% ดินเหนียวสงขลาหลังผสมด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6

1) อิทธิพลของปริมาณเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อความหนาแน่นแห้งสูงสุด

จากผลการบดอัดแบบมาตรฐานของดินเหนียวสงขลาหลังจากผสมด้วยเถ้าแกลบ (RHA) และเถ้าไม้ยางพารา (RWA) เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าแกลบ โดยการแทนที่เถ้าแกลบเพียงอย่างเดียวในอัตราส่วนตั้งแต่ 5-50% พบว่าการผสมเถ้าแกลบในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าลดลงในช่วง 3.12-22.92% และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าทั้งสองชนิดในอัตราส่วนผสมตั้งแต่ 10-50% โดยเถ้าแกลบแทนที่ในปริมาณที่น้อยกว่า เท่ากันและมากกว่าเถ้าไม้ยางพารา พบว่าในอัตราส่วนเถ้าแกลบปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงอย่างชัดเจน โดยมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 3.85-21.73% ดังค่าในตารางที่ 4.6 และในรูปที่ 4.9

จากผลการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานของดินเหนียวสงขลาหลังจากผสมด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าไม้ยางพารา โดยการแทนที่เถ้าไม้ยางพาราเพียงชนิดเดียวในอัตราส่วนจาก 5-50% พบว่าการผสมเถ้าไม้ยางพาราเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงจาก 1.46-11.2% ตามลำดับ เช่นเดียวกับการผสมเถ้าแกลบเพียงชนิดเดียวและเมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าทั้งสองชนิดในอัตราส่วนผสมจาก 10-50% โดยกรณีที่เถ้าไม้ยางพาราแทนที่ในปริมาณที่น้อยกว่า เท่ากับและน้อยกว่าเถ้าแกลบ พบว่าการผสมเถ้าไม้ยางพาราในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่เป็นการเพิ่มขึ้นในกรณีอัตราส่วนผสมของเถ้าทั้งสองชนิดในแต่ละอัตราส่วนเท่านั้นแต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของดินเดิมมีค่าลดลง ที่อัตราส่วนผสม 10% 15% 20% 25% 30% 35% 40% และ 50% ลดลง 3.85% 4.57% 5% 5.3% 5.04% 6.56% และ 14.97% ตามลำดับ ดังค่าในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.10

2) อิทธิพลของปริมาณเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

จากผลการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานของดินเหนียวอ่อนสงขลาหลังผสมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าแกลบ โดยที่แทนที่ปริมาณของเถ้า

แกลบเพียงชนิดเดียวในอัตราส่วนตั้งแต่ 5-50% พบว่าการผสมแกลบในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของแกลบ โดยที่เพิ่มจาก 7.8%-55.78% และเมื่อพิจารณาแกลบทั้งสองชนิดในอัตราส่วนตั้งแต่ 10-50% หากแกลบแทนที่ในปริมาณที่น้อยกว่า เท่ากันและมากกว่าแกลบไม่ย่างพารา พบว่าในปริมาณการผสมแกลบที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.11

จากผลการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานของดินเหนียวอ่อนสงขลา หลังผสมแกลบและแกลบไม่ย่างพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของแกลบไม่ย่างพาราแทนที่แกลบเพียงชนิดเดียวในอัตราส่วนที่ 5-50% พบว่าการผสมแกลบไม่ย่างพาราในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมลดลงแต่มีค่าเพิ่มขึ้นที่แกลบไม่ย่างพารา 5% แรกเท่านั้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของแกลบไม่ย่างพารามากขึ้นเป็น 10-50% กลับส่งผลให้ค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมลดลงอย่างต่อเนื่องและเมื่อพิจารณาแกลบทั้งสองชนิด โดยแกลบไม่ย่างพาราแทนที่ในปริมาณที่น้อยกว่า เท่ากันและมากกว่าแกลบ พบว่าแกลบไม่ย่างพาราเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าปริมาณความชื้นลดลงทุกอัตราส่วนผสม แสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.12

จากทั้ง 2 กรณี ดังกล่าวอิทธิพลของปริมาณแกลบและแกลบไม่ย่างพาราต่อความหนาแน่นแห้งสูงสุดและอิทธิพลต่อปริมาณความชื้นที่เหมาะสมการปรับปรุงสมบัติด้วยแกลบและแกลบไม่ย่างพาราส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง เนื่องจากอนุภาคของแกลบและแกลบไม่ย่างพาราภายในมีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไปจึงมีน้ำหนักเบา ส่วนการดูดซึมน้ำแกลบช่วยในการดูดซึมน้ำได้ดีแต่แกลบไม่ย่างพาราไม่ช่วยในการดูดซึมน้ำเพราะมีลักษณะคล้ายทรายแต่มีรูพรุนอยู่ทั่วเม็ดเช่นเดียวกับแกลบ ซึ่งเมื่อนำแกลบทั้งสองชนิดมาผสมกันจะช่วยในการดูดซึมน้ำได้ดีในระดับหนึ่ง โดยจะพบว่าค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเพิ่มขึ้น กรณีปรับปรุงดินที่มีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (NWC) สูงจะช่วยให้การลดปริมาณความชื้น (ω) ในดินที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพและช่วยลดระยะเวลาในการก่อสร้าง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาศึกษาของดิษฐพร (2551) ได้กล่าวเกี่ยวกับการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน พบว่าการผสมแกลบไยปาล์มน้ำมันและแกลบไม่ย่างพาราในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงตั้งแต่ 0 ถึง 3% ที่อัตราส่วนผสมจาก 5 ถึง 30% ตามลำดับ

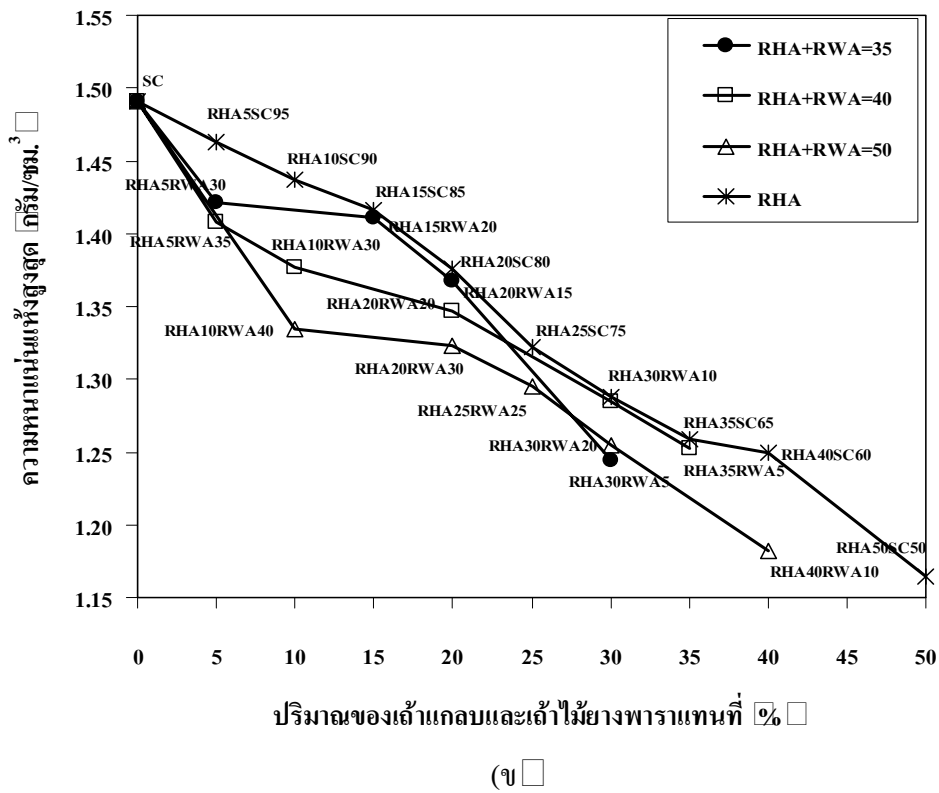
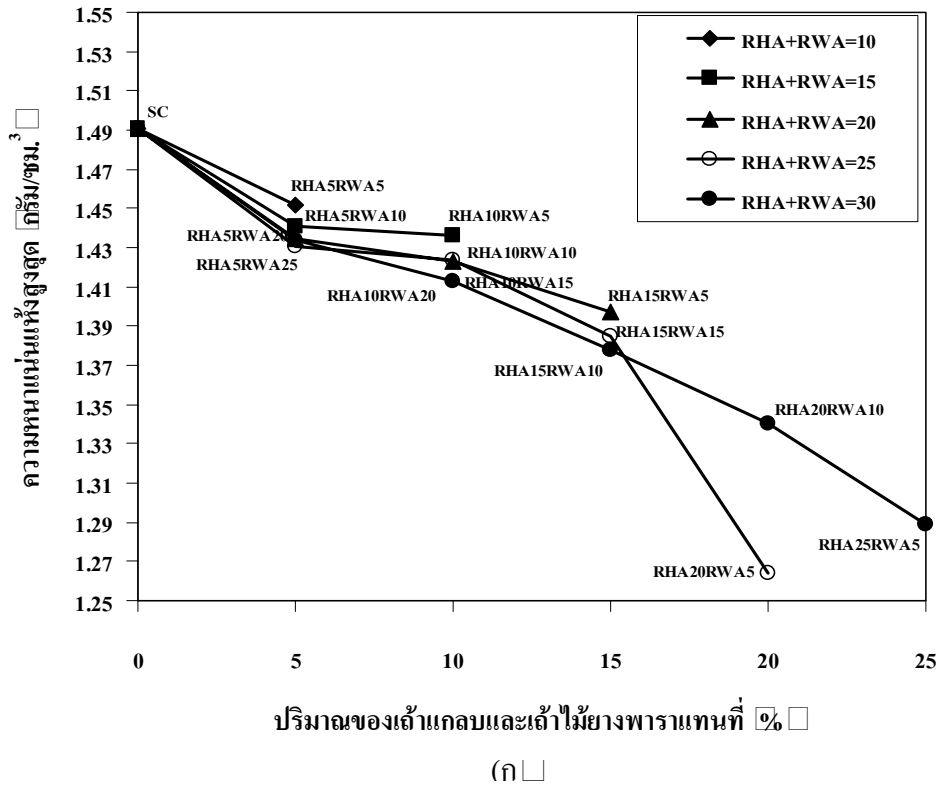
Chen et al. (2009) ได้อธิบายผลการทดสอบการบดอัดดินอ่อนพื้นทางเดิม หลังจากปรับปรุงสมบัติด้วยแกลบจากเตากลั่นน้ำมันและปูนซีเมนต์ พบว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของแกลบจากเตากลั่นน้ำมันและปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง

ตารางที่ 4.6 ผลการบดอัดแบบมาตรฐานของดินเหนียวสงขลา ก่อนและหลังปรับปรุง

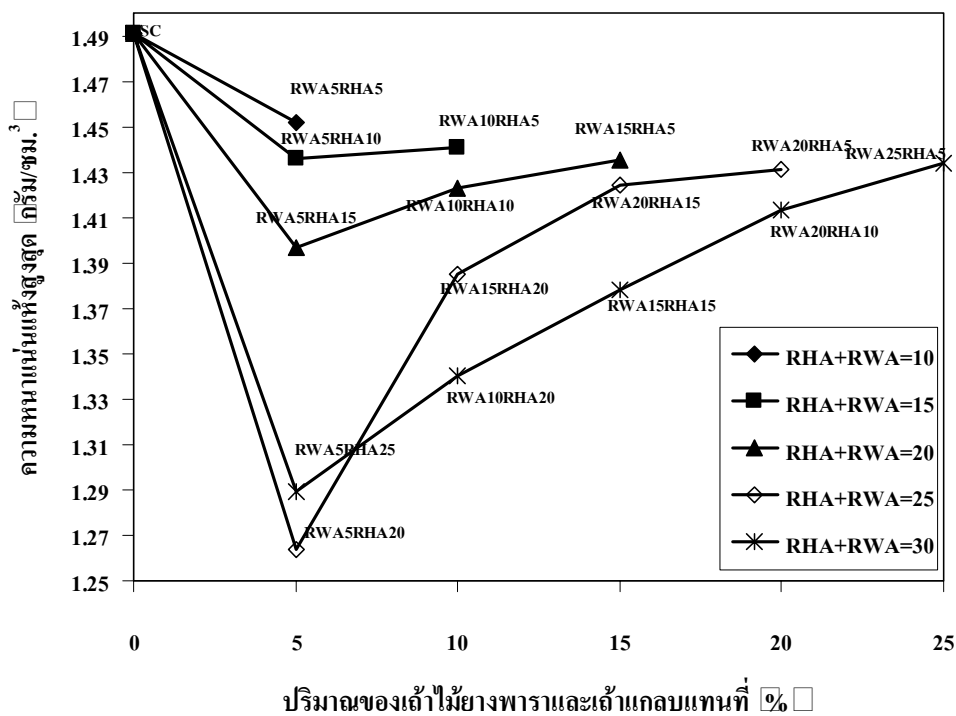
สัญลักษณ์	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด γ_d กก./ม. ³	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม OMC %
SC	1510	26.78
RHA5	1463	28.87
RHA10	1437	29.37
RHA15	1416	31.54
RHA20	1376	32.58
RHA25	1322	34.27
RHA30	1288	35.96
RHA35	1259	36.69
RHA40	1249	37.01
RHA50	1164	41.70
RWA5	1488	28.80
RWA10	1479	28.78
RWA15	1470	28.72
RWA20	1461	28.66
RWA25	1451	28.55
RWA30	1425	28.43
RWA35	1391	27.98
RWA40	1351	27.59
RWA50	1341	27.41
RHA5RWA5	1452	28.86
RHA5RWA10	1441	28.76
RHA10RWA5	1436	29.31
RHA5RWA15	1435	28.90
RHA10RWA10	1423	30.41
RHA15RWA5	1397	31.56
RHA5RWA20	1431	28.81
RHA10RWA15	1424	28.97

ตารางที่ 4.6 ผลการบดอัดแบบมาตรฐานของดินเหนียวสงขลา ก่อนและหลังปรับปรุง (ต่อ)

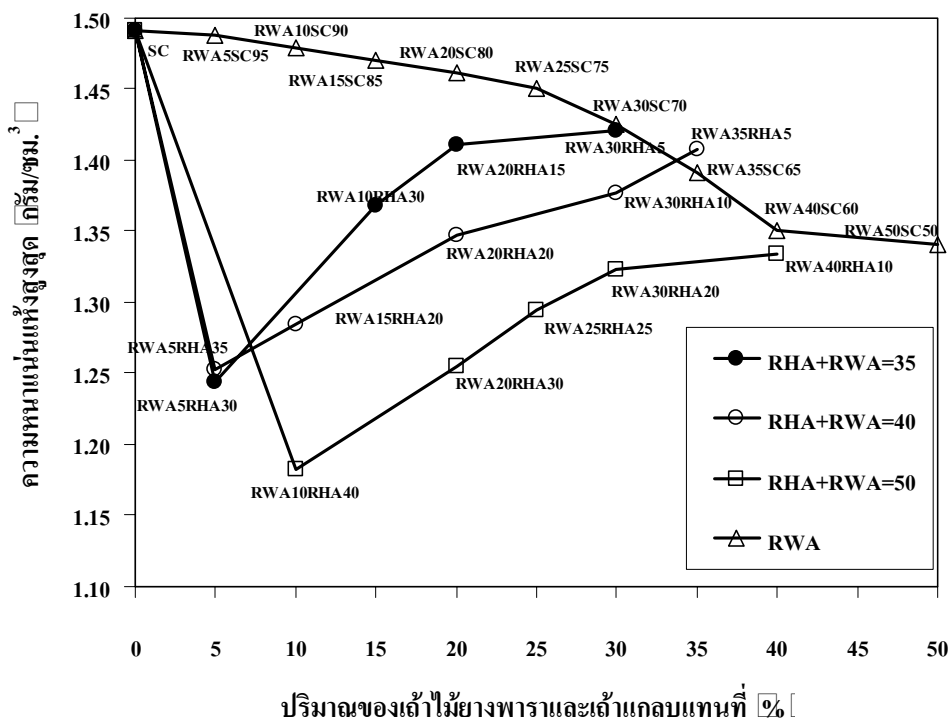
สัญลักษณ์	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด γ_d กก./ม. ³	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม OMC %
RHA15RWA10	1385	29.46
RHA20RWA5	1264	31.14
RHA5RWA25	1434	29.04
RHA10RWA20	1413	29.90
RHA15RWA15	1378	30.71
RHA20RWA10	1340	33.38
RHA25RWA5	1289	34.32
RHA5RWA30	1421	30.11
RHA15RWA20	1411	30.89
RHA20RWA15	1368	32.07
RHA30RWA5	1244	33.84
RHA5RWA35	1408	29.53
RHA10RWA30	1377	31.00
RHA20RWA20	1347	32.36
RHA30RWA10	1285	35.61
RHA35RWA5	1253	36.54
RHA10RWA40	1284	30.61
RHA20RWA30	1263	33.00
RHA25RWA25	1225	34.78
RHA30RWA20	1195	36.51
RHA40RWA10	1182	39.00



รูปที่ 4.9 การแปรปรวนของคุณลักษณะการบดอัดของค่าหนาแน่นแห้งสูงสุดในดินตัวอย่างที่ผสม ก) RHA+RWA 10-30% และ ข) RHA 5-50% และ RHA+RWA 35-50%

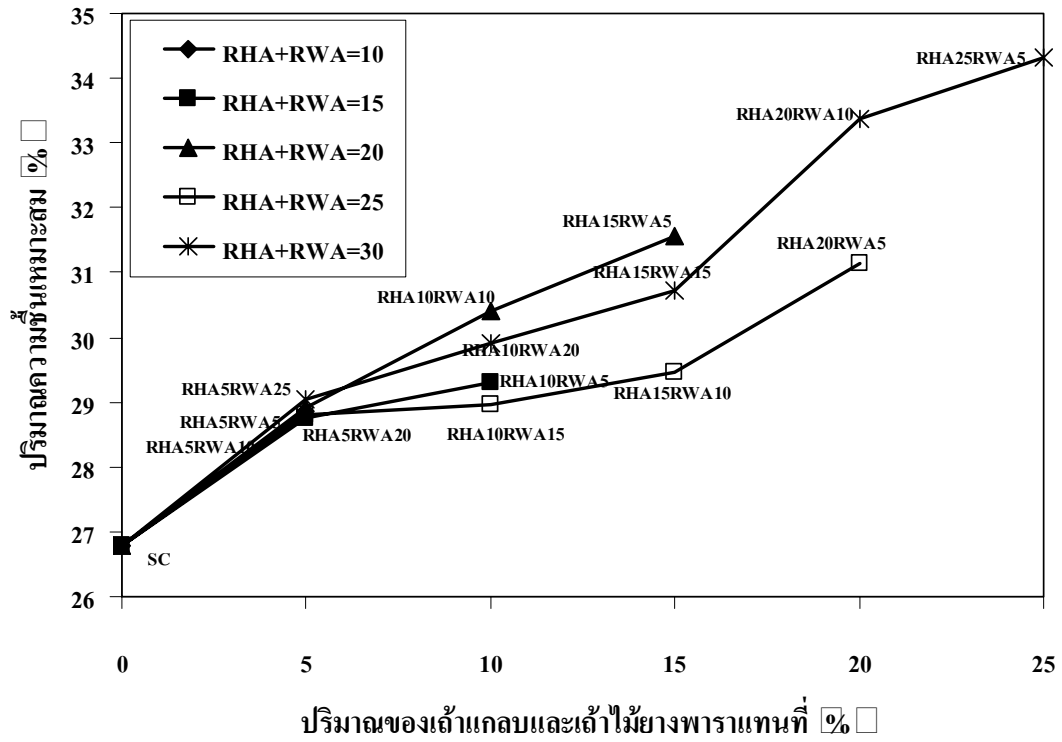


ก □

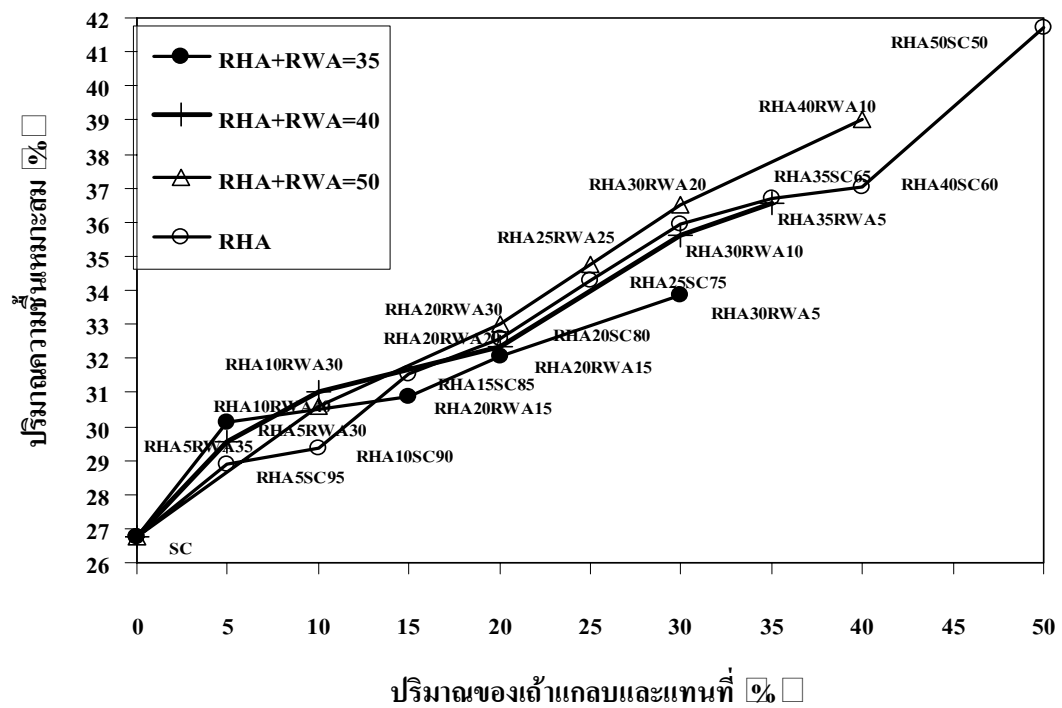


ข □

รูปที่ 4.10 การแปรปรวนของคุณลักษณะการบดอัดของค่าหนาแน่นแห้งสูงสุดในดินตัวอย่างที่ผสม ก □ RWA+RHA 10-30% และ ข □ RWA 5-50% และ RWA+RHA 35-50%

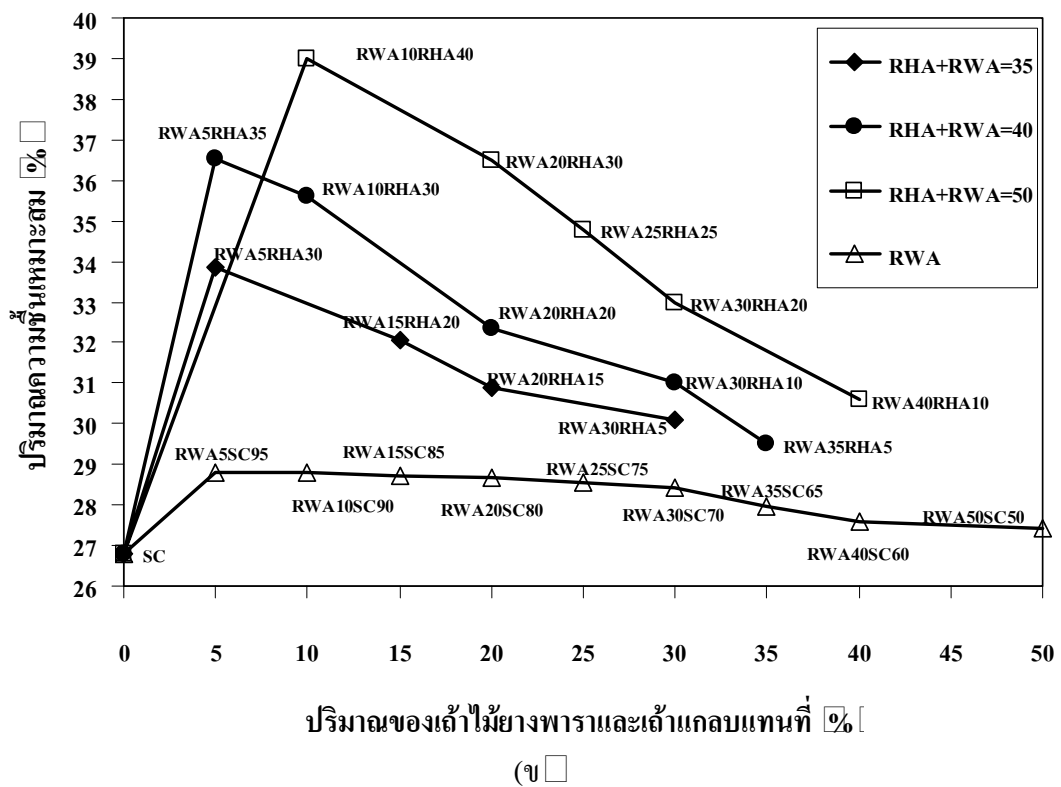
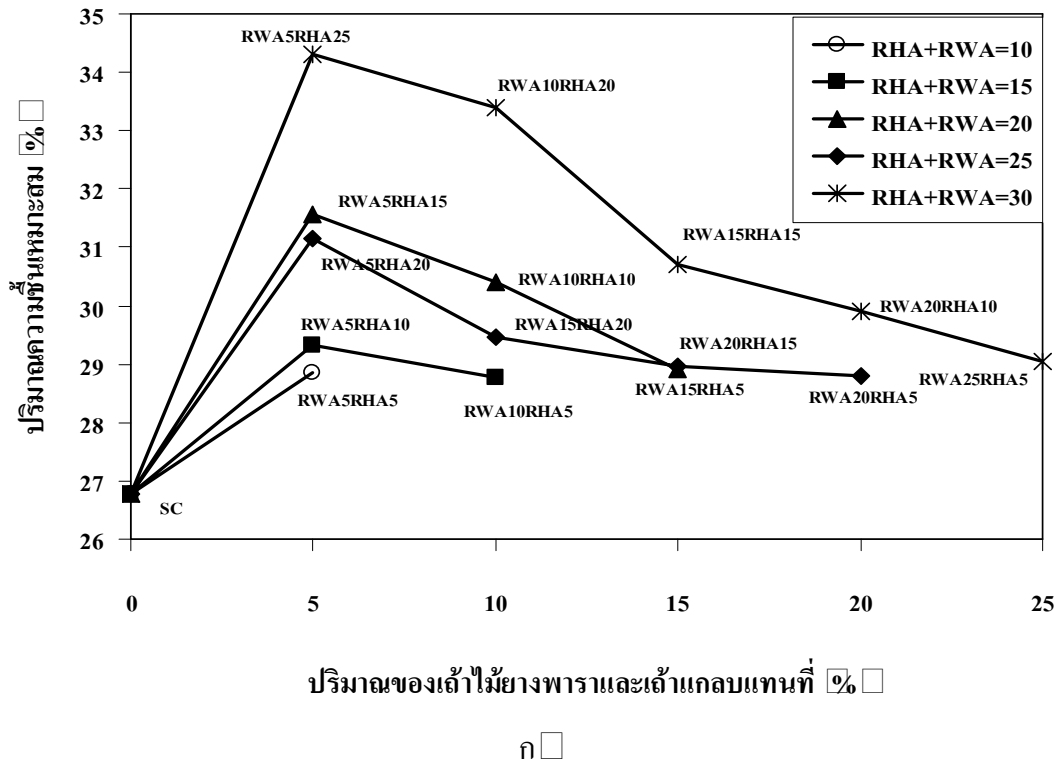


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.11 การแปรปรวนของคุณลักษณะการบดอัดของค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมในดินตัวอย่าง ที่ผสมกับ ก RHA+RWA 10-30% และ ข RHA 5-50% และ RHA+RWA 35-50%



รูปที่ 4.12 การแปรปรวนของคุณลักษณะการบดอัดของค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมในดินตัวอย่างที่ผสมกับ ก RWA+RHA 10-30% และ ข RWA 5-50% และ RWA+RHA 35-50%

Kolias et al. (2005) ได้กล่าวถึงผลการทดสอบการบดอัดของเหนียวอ่อน 2 ชนิด คือ CL และ CH หลังจากปรับปรุงสมบัติด้วยเถ้าลอยมีแคลเซียมสูงและปูนซีเมนต์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้าลอยมีแคลเซียมสูงมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง

4.3.3 กำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวสงขลาและกรณีหลังปรับปรุง

จากผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ซึ่งก่อนตัวอย่างทั้งหมดใช้พลังงานในการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) และใช้ปริมาณน้ำที่จุดปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) พบว่าดินเหนียวสงขลามีค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 1 7 14 28 และ 56 วัน เท่ากับ 0.47 0.48 0.49 0.51 และ 0.51 กก./ซม.² ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนสงขลา คือ ปริมาณการแทนที่ของเถ้าเคลบ 20% และเถ้าไม้ยางพารา 30% โดยมีผลให้มีค่ากำลังอัดสูงสุดและมีอัตราการพัฒนากำลังอัดอย่างชัดเจน โดยค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 1 7 14 28 และ 56 วัน เท่ากับ 1.72 3.11 3.80 5.39 และ 5.52 กก./ซม.² ตามลำดับ ซึ่งค่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่อายุบ่ม 1 7 14 และ 28 วัน และมีแนวโน้มคงที่เมื่อมีอายุบ่มที่ 56 วัน โดยค่ากำลังอัดเริ่มจะคงที่และผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวทุกอัตราส่วน ดังค่าในตารางที่ 4.7 กระบวนการเพิ่มของค่ากำลังอัดเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าเคลบและเถ้าไม้ยางพาราทำให้เกิดเป็นสารประกอบใหม่คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งมีสมบัติเชื่อมเกาะ (Cementitious) เพิ่มขึ้นตามเวลาบ่ม

1) อิทธิพลของปริมาณเถ้าเคลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อหน่วยน้ำหนักรวม

จากการวิเคราะห์หน่วยน้ำหนักรวมของตัวอย่างในกรณีดินเหนียวอ่อนสงขลา ก่อนและหลังปรับปรุงด้วยเถ้าเคลบและเถ้าไม้ยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณเถ้าเคลบ โดยที่ผสมเถ้าเคลบเพียงชนิดเดียวในอัตราส่วนผสมตั้งแต่ 5-50% พบว่าการผสมเถ้าเคลบในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักรวมลดลงจาก 6% ถึง 28% ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ค่าหน่วยน้ำหนักรวมของก่อนตัวอย่างในกรณีของดินเหนียวอ่อนสงขลาและหลังปรับปรุงด้วยเถ้าเคลบและเถ้าไม้ยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณเถ้าไม้ยางพารา โดยที่ผสมเถ้าไม้ยางพาราเพียงชนิดเดียวในอัตราส่วนผสมตั้งแต่ 5-50% พบว่าการผสมเถ้าไม้ยางพาราในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักรวมลดลงจาก 3% ถึง 21% ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ค่าหน่วยน้ำหนักรวมของดินเหนียวอ่อนสงขลา หลังปรับปรุงด้วยเถ้าเคลบและเถ้าไม้ยางพารารวมกันทั้งสองชนิดในอัตราส่วนผสมตั้งแต่ 10-50% ส่งผลให้หน่วย

น้ำหนักรวมลดลงจาก 11% ถึง 27% ที่ปริมาณของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารารวมกันที่เพิ่มขึ้น แต่ถ้ายิ่งปริมาณเถ้าไม้ยางพาราเพิ่มขึ้นชนิดเดียว จะมีผลทำให้หน่วยน้ำหนักรวมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าปริมาณของเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นทำให้หน่วยน้ำหนักลดลง

2 □ อิทธิพลของปริมาณเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อค่ากำลังอัดแกนเดียว

จากการวิเคราะห์ค่ากำลังอัดกรณีของดินเหนียวอ่อนสงขลาและหลังจากปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าแกลบโดยการแทนที่เถ้าแกลบเพียงชนิดเดียวในอัตราส่วนตั้งแต่ 5-50% พบว่าการผสมเถ้าแกลบในปริมาณที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 5-40% ส่งผลให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอย่างต่อเนื่องจาก 3.75 ถึง 132% แต่เมื่อผสมเถ้าแกลบ 50% กลับส่งผลให้กำลังอัดลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นได้ลดลงเนื่องจากแต่ปริมาณของ CaO ในเถ้าแกลบที่มีอยู่เล็กน้อยและปริมาณของ SiO₂ ในดินเหนียวสงขลาและเถ้าแกลบที่มีมากกว่าความต้องการ ในการทำปฏิกิริยากับ CaO จึงทำให้กำลังอัดไม่สามารถพัฒนาเพิ่มขึ้นและอาจทำให้กำลังอัดหยุดชะงักลงและเมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าทั้งสองชนิดในอัตราส่วนผสมตั้งแต่ 10-50% โดยกรณีที่มีอัตราส่วนเถ้าแกลบแทนที่น้อยกว่า เท่ากันและมากกว่าเถ้าไม้ยางพารา พบว่าเถ้าแกลบในปริมาณที่เพิ่มขึ้นแต่มีในปริมาณที่น้อยกว่าและเท่ากับเถ้าไม้ยางพารา ส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อผสมเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นในปริมาณแทนที่มากกว่าเถ้าไม้ยางพารา กลับส่งผลให้กำลังอัดลดลง ซึ่งเป็นลักษณะเช่นเดียวกันในทุกอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.13

สำหรับอิทธิพลของเถ้าไม้ยางพารา โดยการแทนที่เถ้าไม้ยางพาราเพียงชนิดเดียวในอัตราส่วนผสมตั้งแต่ 5-50% พบว่าการผสมเถ้าไม้ยางพาราในปริมาณที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 5-40% ส่งผลให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 4.25 ถึง 134% แต่เมื่อผสมเถ้าแกลบ 50% กลับส่งผลให้กำลังอัดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับ Mitchell (1976) พบว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้เกิดกำลังอัดของดินเหนียวผสมปูนขาวเพิ่มขึ้นแต่จากปริมาณของ SiO₂ ที่มีอยู่จำกัดค่าหนึ่ง ถ้ามีการเพิ่มปูนขาวจนมากกว่าความต้องการในการทำปฏิกิริยากับ SiO₂ ปูนขาวที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลให้กำลังอัดลดลง โดยในเถ้าไม้ยางพาราประกอบด้วย CaO เป็นองค์ประกอบหลักแต่ปริมาณ SiO₂ ที่มีอยู่จำกัดในดิน จึงทำให้กำลังอัดไม่เพิ่มขึ้นแต่ลดลง และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าทั้งสองชนิดในอัตราส่วนผสมตั้งแต่ 10-50% โดยกรณีที่มีเถ้าไม้ยางพาราแทนที่น้อยกว่า เท่ากับและมากกว่าเถ้าแกลบ การผสมเถ้าไม้ยางพาราของแต่ละอัตราส่วนเมื่อเทียบอัตราส่วนปริมาณของเถ้าทั้งสองชนิด พบว่าการผสมเถ้าไม้ยางพาราในช่วง 12 ถึง 65% ของปริมาณเถ้าทั้งสองชนิดส่งผลให้กำลังอัดมีค่า

เพิ่มมากขึ้น แต่หากผสมเถ้าไม้ยางพาราในแต่ละอัตราส่วนผสมมากกว่าช่วงดังกล่าวกลับส่งผลให้กำลังอัดลดลงดังแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.14

จากการวิเคราะห์ค่ากำลังอัดพบว่าดินเหนียวสงขลาหลังจากผสมด้วยเถ้าทั้งสองชนิด ส่งผลให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าการผสมด้วยเถ้าแกลบหรือเถ้าไม้ยางพาราเพียงชนิดเดียว เนื่องจากเถ้าไม้ยางพารามี CaO เป็นองค์ประกอบหลักเมื่อสัมผัสกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาเคมีดังนี้ คือ CaO จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็น Ca(OH)_2 ซึ่งสารนี้จะทำปฏิกิริยาต่อไปกับ SiO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในเถ้าแกลบและในดินเหนียวสงขลา เกิดเป็นสารประกอบใหม่ขึ้นคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต (CAH) ซึ่งมีสมบัติเชื่อมประสานให้เนื้อดินติดกันแน่นขึ้น ขณะเดียวกันช่วยลดช่องว่างในเนื้อดิน จึงส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับของดิษฐพร (2551) ที่กำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวปากพนังผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา ส่งผลให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงกว่าการผสมด้วยเถ้าไยปาล์มน้ำมันหรือเถ้าไม้ยางพาราเพียงชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงชนิดเดียว โดยเพิ่มขึ้นถึง 218% ที่อัตราส่วนผสมเถ้าทั้งสองชนิดเท่ากันที่ 20% และมีอายุบ่ม 56 วัน

Basha et al. (2005) กล่าวถึงอิทธิพลของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบในการปรับปรุงดินเดิมให้มีความมั่นคง ผลพบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น และพบอีกว่าการเพิ่มปริมาณของเถ้าแกลบในอัตราส่วนที่ 20% และปูนซีเมนต์ที่ 4% ให้กำลังอัดสูงสุดถึง 540 kPa โดยเพิ่มขึ้นเป็น 110% เมื่อเปรียบเทียบกับดินเดิม แต่ถ้าผสมเถ้าแกลบมากกว่า 20% ก็จะทำให้กำลังอัดลดลง นอกจากนี้ Lin et al. (2007) พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมระหว่างเถ้าจากเตาน้ำมันต่อปูนขาวที่มีอัตราส่วนเพิ่มขึ้นและยังพัฒนากำลังตามอายุบ่มที่เพิ่มมากขึ้นด้วย

3 อิทธิพลของอายุการบ่มต่อค่ากำลังอัดแกนเดียว

ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว พบว่าดินเหนียวสงขลาที่มีค่าอัตราการเพิ่มค่ากำลังอัดที่คงที่ โดยอายุการบ่มไม่มีผลต่ออัตราการเพิ่มของค่ากำลังอัด แต่กรณีของดินเหนียวสงขลาหลังจากปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบ 20% และเถ้าไม้ยางพารา 30% มีอัตราการเพิ่มค่ากำลังอัดอย่างชัดเจน โดยมีอัตราการเพิ่มค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 1 7 14 28 และ 56 วัน เท่ากับ 331.91 547.91 673.47 956.86 และ 982.35% และในการพิจารณาค่ากำลังอัดที่ 28 วัน ปรากฏว่าอัตราส่วนการผสมทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.22 อัตราการเพิ่มกำลังอัดเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮดรชันของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราเป็นปฏิกิริยาหลักของการเพิ่มกำลังอัดที่ต้องอาศัยเวลาในการเกิดและมีการพัฒนาเพิ่มกำลัง

อัดตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นและจะเริ่มมีแนวโน้มคงที่เมื่อมีอายุบ่ม 56 วัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของเซาวนี่ย์ (2544) ได้อธิบายถึงผลกำลังอัดแกนเดียวกับระยะเวลาบ่ม ของการปรับปรุงดินเหนียวกรุงเทพฯ ด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ พบว่าเมื่อนำดินตัวอย่างที่หลังจากปรับปรุงคุณภาพไปบ่มที่อายุต่างกันที่ 3 7 14 และ 28 วัน ส่งผลให้ค่ากำลังอัดเพิ่มมากขึ้นตามอายุบ่มที่เพิ่มขึ้นจาก 12 ถึง 48%

ศิษฐพร (2551) ได้กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังอัดแกนเดียวกับอายุการบ่ม จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของดินเหนียวปากพนังด้วยเถ้าไยปาล์ม น้ำมัน และ ไม้ยางพารา พบว่าเมื่อนำก้อนตัวอย่างหลังปรับปรุงสมบัติแล้วหลังจากบ่มที่อายุบ่มต่างๆกันคือ 1 7 14 28 และ 56 วัน ส่งผลให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยเฉพาะอย่างที่สุดที่ที่ดีที่สุดคือ เถ้าไยปาล์ม น้ำมัน 10% และเถ้าไม้ยางพารา 10% มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 50% ถึง 218% และมีแนวโน้มเหมือนกันทุกอัตราส่วนผสม

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของดินอ่อนเหนียวสงขลา ก่อนและหลังปรับปรุง

สัญลักษณ์	อายุการ บ่ม วัน □	ปริมาณ ความชื้น % □	หน่วย น้ำหนักรวม kg/m ³ □	กำลังอัดแกน เดียว, UCS ksc. □	โมดูลัสของ ความยืดหยุ่น E ₅₀ ksc. □	ความเครียดที่ จุดวิบัติ E _r % □
SC	0	28.76	1503	0.47	4.83	12.88
	7	28.73	1501	0.48	4.72	12.68
	14	28.71	1508	0.49	4.99	12.71
	28	28.70	1503	0.51	5.14	12.80
	56	28.59	1509	0.51	5.16	12.84
RHA5SC95	0	28.17	1416	0.49	5.53	13.04
	7	28.43	1414	0.59	5.52	13.12
	14	27.81	1457	0.88	9.84	13.06
	28	27.74	1414	0.92	25.49	13.01
	56	27.66	1442	1.10	26.11	12.91
RHA10SC90	0	29.11	1294	0.55	5.25	13.54
	7	29.02	1309	0.60	5.81	13.40
	14	28.91	1335	0.96	11.43	13.30
	28	28.84	1330	1.11	26.92	13.15
	56	28.75	1350	1.21	30.12	13.02
RHA15SC85	0	31.14	1245	0.61	5.96	14.62
	7	31.06	1283	0.72	6.04	14.21
	14	30.84	1295	1.05	12.02	14.04
	28	30.84	1317	1.22	27.61	14.00
	56	30.65	1326	1.30	30.56	13.92
RHA20SC80	0	32.20	1235	0.67	6.27	14.79
	7	32.12	1241	0.75	6.08	14.51
	14	32.00	1248	1.11	12.48	14.22
	28	31.87	1256	1.34	28.43	14.11
	56	31.72	1287	1.41	32.89	13.94

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของดินอ่อนเหนียวสงขลา ก่อนและหลังปรับปรุง (ต่อ □)

สัญลักษณ์	อายุการ บ่ม วัน □	ปริมาณ ความชื้น % □	หน่วย น้ำหนักรวม kg/m ³ □	กำลังอัดแกน เดี่ยว UCS ksc. □	โมดูลัสของ ความยืดหยุ่น E ₅₀ ksc. □	ความเครียดที่ จุดวิบัติ E _r % □
RHA25SC75	0	34.02	1224	0.72	6.60	15.94
	7	33.82	1217	0.79	6.70	15.61
	14	33.60	1227	1.18	13.46	15.24
	28	33.45	1231	1.43	29.03	15.11
	56	33.32	1234	1.49	33.24	15.08
RHA30SC70	0	35.55	1219	0.77	7.21	16.11
	7	35.34	1221	0.85	6.85	16.04
	14	35.26	1224	1.23	15.48	15.89
	28	35.12	1227	1.61	30.51	15.79
	56	35.00	1230	1.70	35.00	15.61
RHA35SC65	0	36.43	1139	0.89	8.02	16.98
	7	36.31	1145	0.99	7.95	16.71
	14	36.12	1201	1.28	21.34	16.62
	28	36.01	1173	1.82	31.21	16.44
	56	35.88	1178	1.89	41.02	16.26
RHA40SC60	0	36.81	1118	1.12	15.44	17.41
	7	36.71	1130	1.23	13.71	17.22
	14	36.62	1138	1.35	30.67	17.09
	28	36.52	1144	1.93	35.08	16.83
	56	36.41	1142	2.08	44.53	16.74
RHA50SC50	0	41.56	1086	1.09	10.40	18.21
	7	41.38	1096	1.14	12.39	18.01
	14	41.21	1107	1.47	23.32	17.86
	28	41.11	1101	1.87	9.98	17.71
	56	41.00	1117	1.92	41.87	17.57

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของดินอ่อนเหนียวสงขลาก่อนและหลังปรับปรุง (ต่อ □)

สัญลักษณ์	อายุการ บ่ม วัน □	ปริมาณ ความชื้น % □	หน่วย น้ำหนักรวม kg/m ³ □	กำลังอัดแกน เดี่ยว UCS ksc. □	โมดูลัสของ ความยืดหยุ่น E ₅₀ ksc. □	ความเครียดที่ จุดวิบัติ E _r % □
RWA5SC95	0	28.71	1467	0.49	5.20	12.57
	7	28.63	1470	0.52	4.37	12.21
	14	28.51	1465	1.00	18.38	12.11
	28	28.41	1464	1.10	21.24	11.92
	56	28.33	1471	1.21	21.79	11.86
RWA10SC90	0	28.43	1359	0.52	5.92	11.99
	7	28.33	1376	0.55	4.88	11.80
	14	28.16	1386	1.14	20.84	11.64
	28	28.02	1379	1.20	24.17	11.47
	56	27.93	1350	1.29	29.41	11.21
RWA15SC85	0	28.36	1343	0.68	6.25	10.94
	7	28.21	1370	0.89	7.85	10.71
	14	28.04	1380	1.21	24.21	10.62
	28	27.91	1371	1.27	27.96	10.55
	56	27.62	1349	1.34	36.00	10.43
RWA20SC80	0	28.20	1330	0.76	14.96	10.44
	7	28.02	1366	0.96	11.40	10.20
	14	27.92	1375	1.69	30.05	10.05
	28	27.74	1360	1.72	31.65	9.98
	56	27.62	1335	1.80	44.04	9.86
RWA25SC75	0	27.98	1320	0.84	19.27	9.57
	7	27.86	1352	1.16	16.06	9.02
	14	27.69	1362	1.75	38.69	8.66
	28	27.54	1348	1.82	33.91	8.46
	56	27.42	1305	1.91	48.55	7.61

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของดินอ่อนเหนียวสงขลา ก่อนและหลังปรับปรุง (ต่อ □)

สัญลักษณ์	อายุการ บ่ม วัน □	ปริมาณ ความชื้น % □	หน่วยน้ำหนัก รวม kg/m ³ □	กำลังอัดแกน เดี่ยว UCS ksc. □	โมดูลัสของ ความยืดหยุ่น E ₅₀ ksc. □	ความเครียดที่ จุดวิบัติ ε _r % □
RWA30SC70	0	27.74	1315	0.93	19.39	8.35
	7	27.67	1345	1.20	18.12	8.03
	14	27.51	1338	1.81	40.21	7.83
	28	27.29	1333	1.94	62.04	7.77
	56	27.15	1297	2.02	65.84	6.86
RWA35SC65	0	27.52	1310	1.04	23.17	7.21
	7	27.41	1338	1.3	28.38	6.76
	14	27.29	1334	1.88	43.09	6.12
	28	27.09	1313	2.02	84.64	6.04
	56	26.94	1235	2.11	97.85	5.26
RWA40SC60	0	27.41	1300	1.14	50.00	5.47
	7	27.13	1321	1.32	45.83	4.71
	14	27.01	1310	1.92	45.14	4.22
	28	26.89	1308	2.12	104.40	4.15
	56	26.75	1229	2.31	111.23	4.06
RWA50SC50	0	27.08	1288	1.01	42.03	5.41
	7	26.88	1306	1.10	23.40	4.28
	14	26.74	1303	1.81	37.12	4.08
	28	26.54	1287	1.54	56.25	4.01
	56	26.40	1198	1.64	61.65	3.84
RHA5RWA5	0	28.46	1278	0.56	5.2	12.57
	7	28.34	1295	0.79	11.83	12.31
	14	28.24	1351	1.07	19.93	12.05
	28	28.11	1352	1.19	23.34	11.96
	56	28.01	1343	1.28	25.71	11.88

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของดินอ่อนเหนียวสงขลา ก่อนและหลังปรับปรุง (ต่อ □)

สัญลักษณ์	อายุการ บ่ม วัน □	ปริมาณ ความชื้น % □	หน่วยน้ำหนัก รวม kg/m ³ □	กำลังอัดแกน เดี่ยว UCS ksc. □	โมดูลัสของ ความยืดหยุ่น E ₅₀ ksc. □	ความเครียดที่ จุดวิบัติ ϵ_r % □
RHA5RWA10	0	28.66	1330	0.64	9.47	11.84
	7	28.51	1328	1.03	22.54	11.61
	14	28.38	1324	1.54	29.66	11.32
	28	28.21	1308	2.16	71.14	11.15
	56	28.11	1303	2.28	82.46	11
RHA10RWA5	0	29.11	1300	0.59	7.05	12.21
	7	29.04	1295	0.89	18.09	12
	14	28.28	1290	1.18	21.08	11.74
	28	28.62	1285	1.98	52.24	11.68
	56	28.51	1280	2.05	59.77	11.41
RHA5RWA15	0	28.61	1327	0.81	10.48	11.36
	7	28.51	1332	1.15	17.52	11.15
	14	28.40	1334	1.70	25.76	11.09
	28	28.30	1354	1.96	67.12	7.32
	56	28.22	1358	2.11	70.67	7.01
RHA10RWA10	0	30.22	1271	0.72	11.00	12.82
	7	30.11	1274	0.90	14.00	12.72
	14	30.01	1301	1.61	23.64	12.04
	28	29.84	1295	1.72	26.67	11.88
	56	29.72	1301	1.82	69.34	10.44
RHA15RWA5	0	31.44	1259	0.52	7.56	13.07
	7	31.36	1245	0.88	8.69	13
	14	31.24	1269	1.14	12.28	12.88
	28	31.08	1285	1.39	21.00	12.68
	56	30.98	1292	1.46	32.13	12.53

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของดินอ่อนเหนียวสงขลา ก่อนและหลังปรับปรุง (ต่อ □)

สัญลักษณ์	อายุการ บ่ม วัน □	ปริมาณ ความชื้น % □	หน่วยน้ำหนัก รวม kg/m ³ □	กำลังอัดแกน เดี่ยว UCS ksc □	โมดูลัสของ ความยืดหยุ่น E ₅₀ ksc □	ความเครียดที่ จุดวิบัติ ε _r % □
RHA5RWA20	0	28.61	1308	0.91	12.81	11.22
	7	28.28	1303	1.23	20.59	11.08
	14	28.10	1298	2.11	23.18	9.14
	28	27.89	1293	2.41	63.66	7.04
	56	27.74	1289	2.62	94.05	6.81
RHA10RWA15	0	28.84	1300	0.98	15.24	11.91
	7	28.69	1284	1.52	48.86	10.80
	14	28.54	1279	2.42	50.21	7.55
	28	28.42	1273	2.95	77.84	6.14
	56	28.30	1269	3.10	121.83	5.66
RHA15RWA10	0	29.38	1281	0.83	13.08	12.86
	7	29.22	1277	1.04	17.07	12.74
	14	29.06	1263	1.96	46.08	12.61
	28	28.91	1257	2.12	54.23	11.32
	56	28.80	1251	2.64	81.88	8.87
RHA20RWA5	0	32.03	1244	0.64	10.52	13.42
	7	31.92	1268	0.96	14.55	13.30
	14	31.74	1254	1.06	33.62	13
	28	31.61	1249	1.88	31.37	12.84
	56	31.51	1235	2.22	62.75	10.14
RHA5RWA25	0	28.88	1334	0.88	10.71	11.01
	7	28.76	1328	1.66	21.77	9.87
	14	28.58	1350	2.38	39.27	8.88
	28	28.41	1371	2.54	61.93	7.94
	56	28.24	1362	2.65	58.84	6.58

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของดินอ่อนเหนียวสงขลา ก่อนและหลังปรับปรุง (ต่อ □)

สัญลักษณ์	อายุการ บ่ม วัน □	ปริมาณ ความชื้น % □	หน่วยน้ำหนัก รวม kg/m ³ □	กำลังอัดแกน เดี่ยว UCS ksc. □	โมดูลัสของ ความยืดหยุ่น E ₅₀ ksc. □	ความเครียดที่ จุดวิบัติ ϵ_r % □
RHA10RWA20	0	29.67	1271	1.16	15.09	12.09
	7	28.63	1307	1.96	27.22	9.21
	14	28.52	1318	2.95	54.44	8.11
	28	28.34	1351	3.08	78.22	7.23
	56	28.20	1350	3.12	65.72	6.79
RHA15RWA15	0	30.54	1326	1.10	14.29	12.88
	7	30.36	1286	2.24	32.94	12.70
	14	30.22	1294	2.45	47.10	12.52
	28	30.08	1314	2.84	49.77	10.48
	56	29.93	1304	2.91	60.67	10
RHA20RWA10	0	33.18	1225	1.07	12.02	13.11
	7	33.01	1246	1.54	17.78	13
	14	32.92	1251	2.21	32.45	12.8
	28	32.74	1268	2.51	26.87	12.55
	56	32.61	1278	2.55	36.99	10
RHA25RWA5	0	34.03	1206	0.79	6.87	13.98
	7	33.86	1230	1.15	10.46	13.73
	14	33.69	1230	1.45	16.15	13.54
	28	33.51	1244	1.52	17.13	12.9
	56	33.40	1248	1.64	18.81	11.12
RHA5RWA30	0	30.03	1296	0.71	26.41	10.82
	7	29.89	1292	1.67	42.63	10.08
	14	29.74	1282	2.05	75.44	7.26
	28	29.51	1262	2.81	64.54	6.78
	56	29.40	1255	2.54	97.87	6.55

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของดินอ่อนเหนียวสงขลา ก่อนและหลังปรับปรุง (ต่อ □)

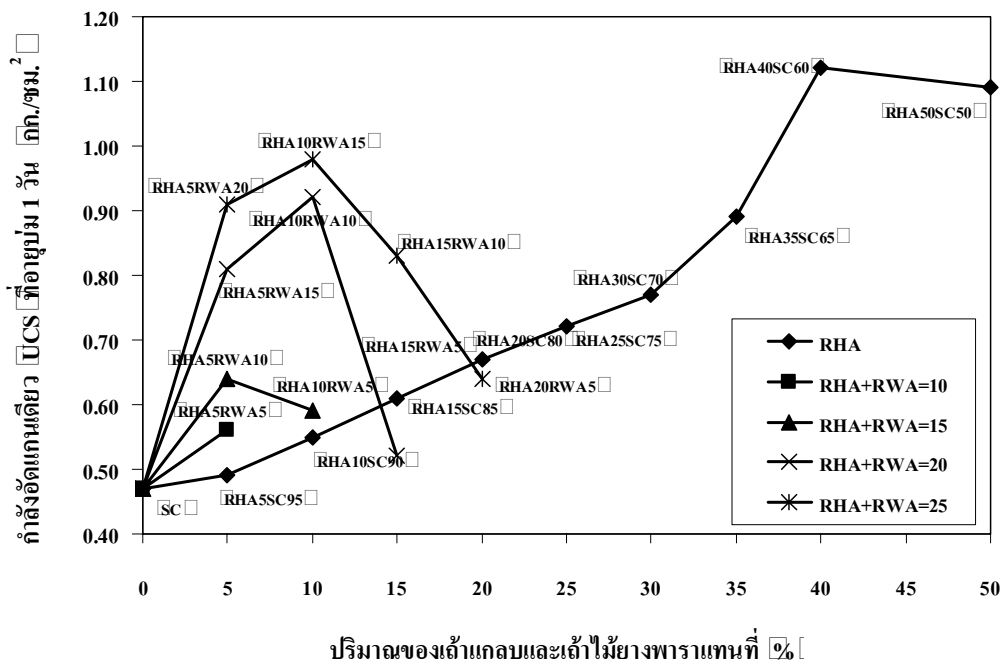
สัญลักษณ์	อายุการ บ่ม วัน □	ปริมาณ ความชื้น % □	หน่วยน้ำหนัก รวม kg/m ³ □	กำลังอัดแกน เดี่ยว UCS ksc. □	โมดูลัสของ ความยืดหยุ่น E ₅₀ ksc. □	ความเครียดที่ จุดวิบัติ ε _r % □
RHA15RWA20	0	30.79	1277	0.98	32.81	12.02
	7	30.61	1247	2.02	56.44	9.41
	14	30.42	1242	2.89	83.87	6.82
	28	30.22	1239	3.06	92.61	5.84
	56	31.10	1234	3.22	134.44	5.71
RHA20RWA15	0	31.98	1241	0.81	24.04	13.93
	7	31.81	1240	1.42	31.34	13.40
	14	31.65	1234	2.14	39.69	12.18
	28	31.51	1221	2.76	44.54	10.07
	56	31.39	1212	2.84	94.08	9.86
RHA30RWA5	0	33.75	1210	0.62	16.41	14.12
	7	33.62	1231	1.06	27.44	14
	14	33.55	1227	1.94	30.45	13.8
	28	33.52	1200	2.22	35.67	12.44
	56	33.42	1193	2.14	61.14	11.89
RHA5RWA35	0	29.48	1321	1.21	25.45	9.39
	7	29.32	1332	1.94	29.21	9.21
	14	29.10	1321	2.85	79.88	6.17
	28	29.00	1334	2.94	91.23	6.06
	56	28.88	1326	2.98	89.17	5.36
RHA10RWA30	0	29.81	1259	1.36	29.38	9.80
	7	29.72	1254	2.64	42.71	8.79
	14	29.54	1275	3.26	86.24	6.09
	28	29.48	1279	3.41	121.09	5.98
	56	29.34	1318	3.49	115.11	5.58

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของดินอ่อนเหนียวสงขลา ก่อนและหลังปรับปรุง (ต่อ □)

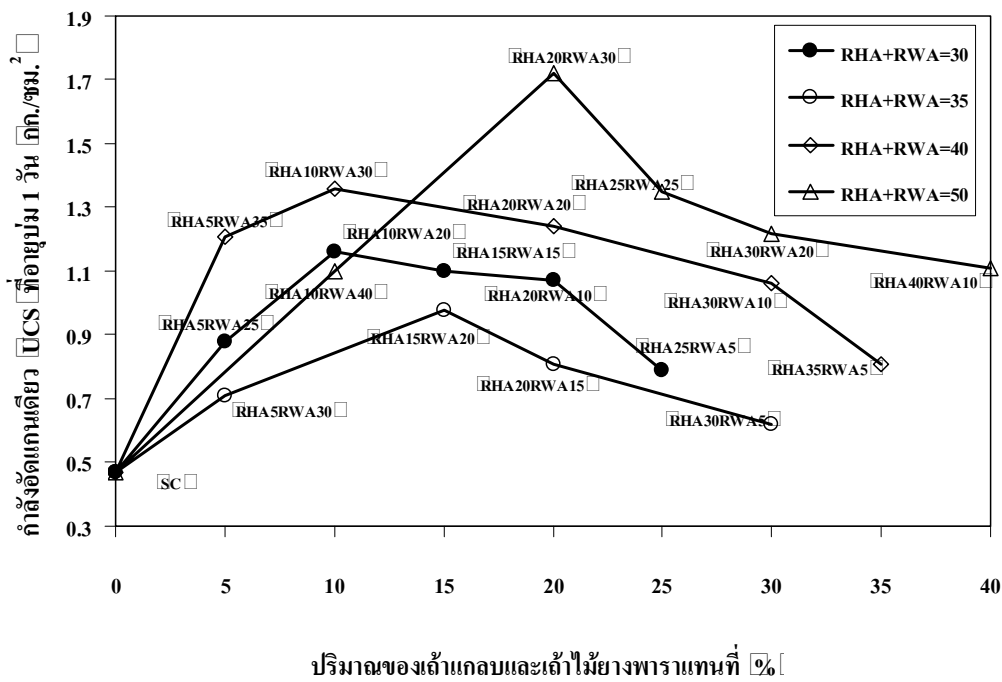
สัญลักษณ์	อายุการ บ่ม วัน □	ปริมาณ ความชื้น % □	หน่วยน้ำหนัก รวม kg/m ³ □	กำลังอัดแกน เดียว, UCS ksc. □	โมดูลัสของ ความยืดหยุ่น E ₅₀ ksc. □	ความเครียดที่ จุดวิบัติ ϵ_r % □
RHA20RWA20	0	32.10	1197	1.24	26.07	13.74
	7	32.02	1245	2.46	38.46	11.32
	14	31.89	1241	3.14	58.15	9.59
	28	31.70	1256	3.23	113.53	9.34
	56	31.58	1304	3.34	83.33	5.95
RHA30RWA10	0	35.12	1136	1.06	15.90	14.85
	7	35.02	1180	1.52	14.05	14.00
	14	34.84	1202	2.26	29.58	12.64
	28	34.64	1211	2.61	86.84	12.03
	56	34.51	1257	2.68	35.35	8.79
RHA35RWA5	0	36.24	1122	0.81	7.05	15.22
	7	36.11	1149	1.48	13.86	14.90
	14	36.00	1137	2.17	21.58	14.18
	28	35.80	1188	2.46	65.46	13.82
	56	35.71	1206	2.65	15.74	13.64
RHA10RWA40	0	30.48	1261	1.10	31.26	9.52
	7	30.32	1270	2.38	66.48	8.26
	14	30.21	1287	3.07	86.51	7.76
	28	31.11	1277	4.64	181.75	2.77
	56	30.05	1302	3.02	40.16	2.18
*** RHA20RWA30	0	32.81	1206	1.72	34.95	10.46
	7	32.61	1212	3.11	100.65	9.01
	14	32.47	1256	3.80	178.01	6.22
	28	32.37	1245	5.39	249.46	2.27
	56	32.20	1277	5.52	267.96	2.04

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของดินอ่อนเหนียวสงขลา ก่อนและหลังปรับปรุง (ต่อ)

สัญลักษณ์	อายุการ บ่ม วัน	ปริมาณ ความชื้น %	หน่วยน้ำหนัก รวม kg/m ³	กำลังอัดแกน เดียว, UCS ksc.	โมดูลัสของ ความยืดหยุ่น E ₅₀ ksc.	ความเครียดที่ จุดวิบัติ ϵ_r %
RHA25RWA25	0	34.59	1164	1.35	24.47	12.54
	7	34.33	1177	2.83	38.59	12.00
	14	34.28	1206	3.72	71.54	11.06
	28	34.04	1221	4.41	131.55	5.05
	56	33.91	1239	4.61	136.68	5.01
RHA30RWA20	0	36.34	1141	1.22	12.99	13.68
	7	36.12	1141	1.36	14.75	13.08
	14	35.94	1169	2.88	43.50	12.00
	28	35.81	1188	3.15	65.69	6.38
	56	35.70	1192	3.21	77.03	5.18
RHA40RWA10	0	38.88	1101	1.11	11.36	14.88
	7	38.74	1124	1.27	13.04	14.00
	14	38.50	1117	2.46	32.45	13.21
	28	38.38	1129	2.93	25.39	7.97
	56	38.26	1161	3.02	40.16	7.18

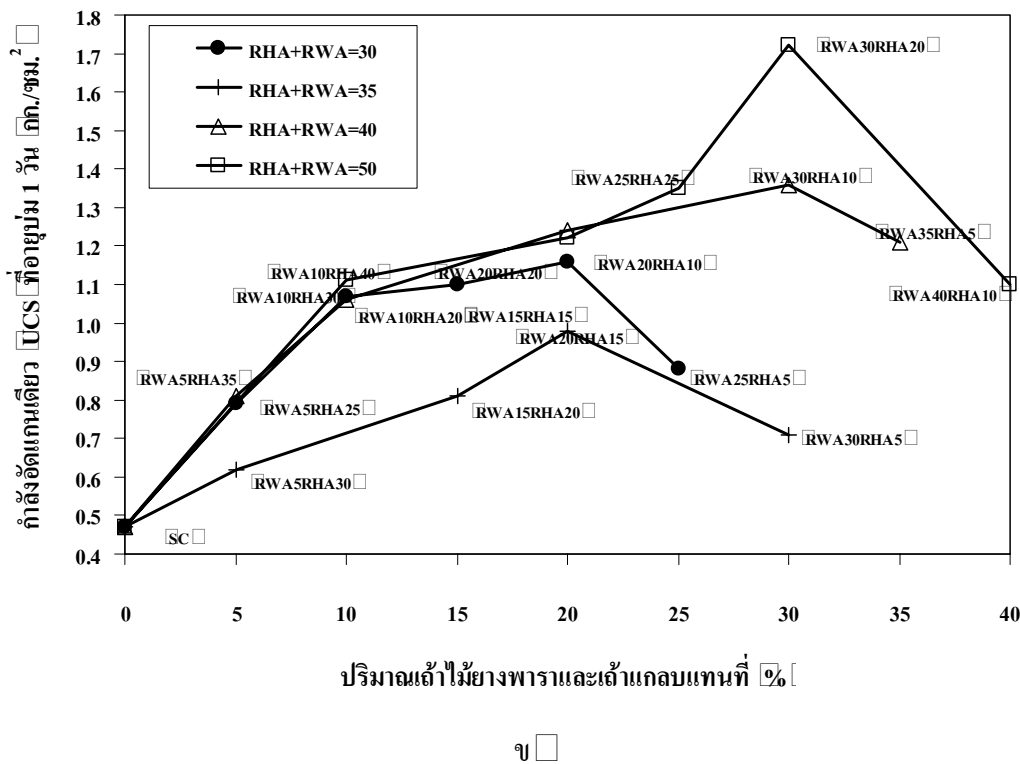
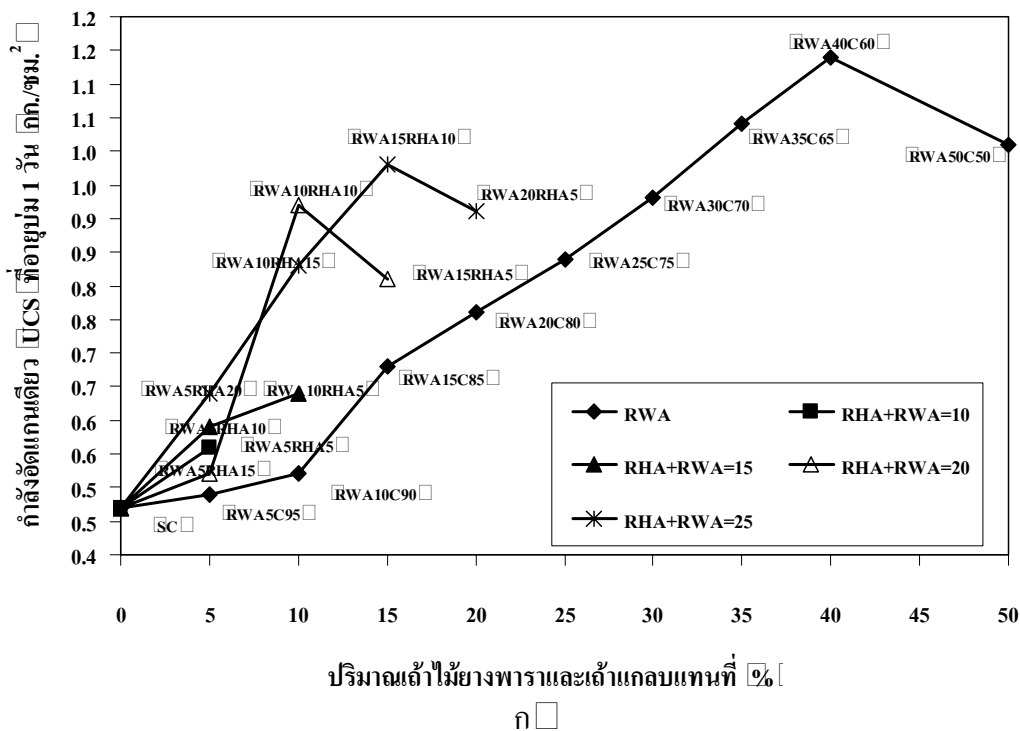


ก

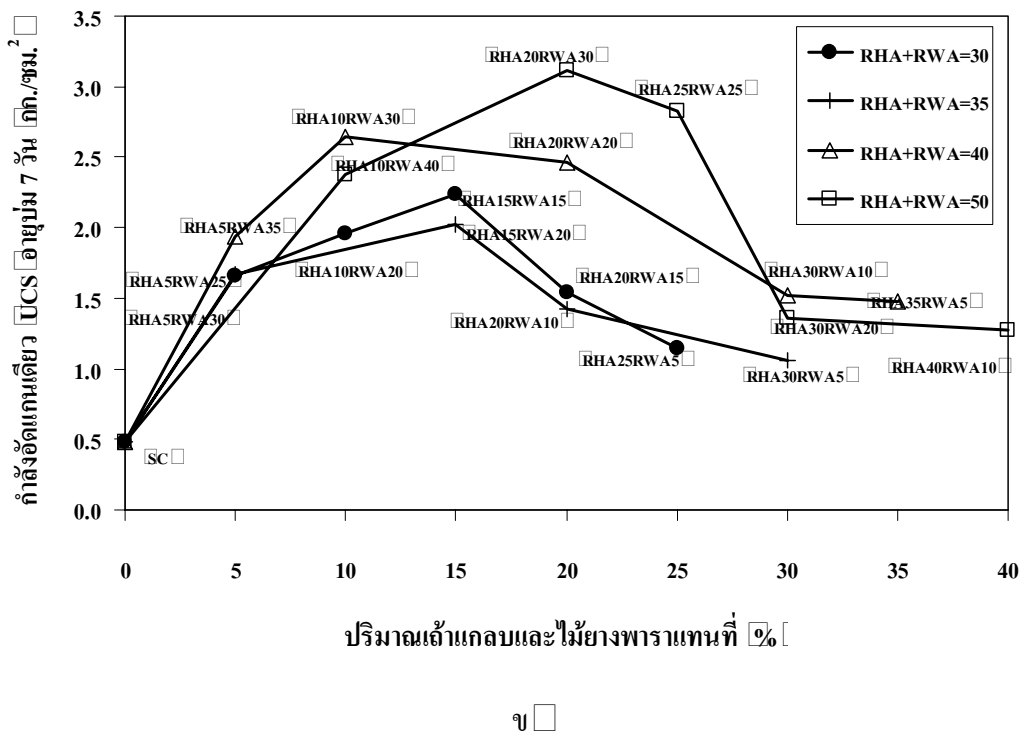
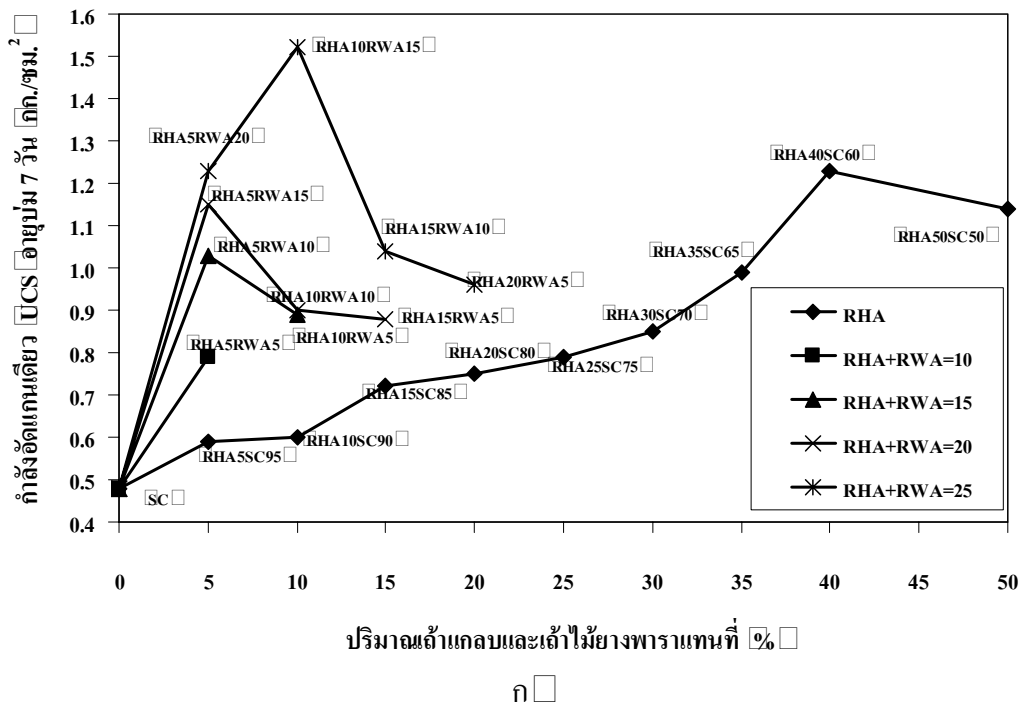


ข

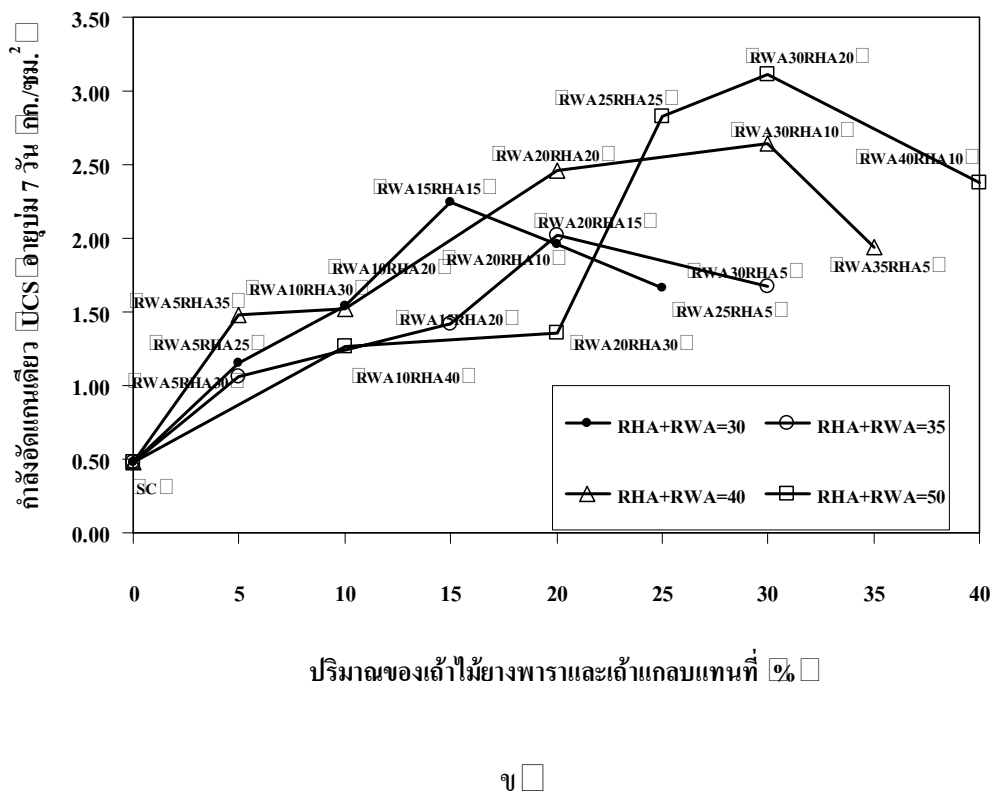
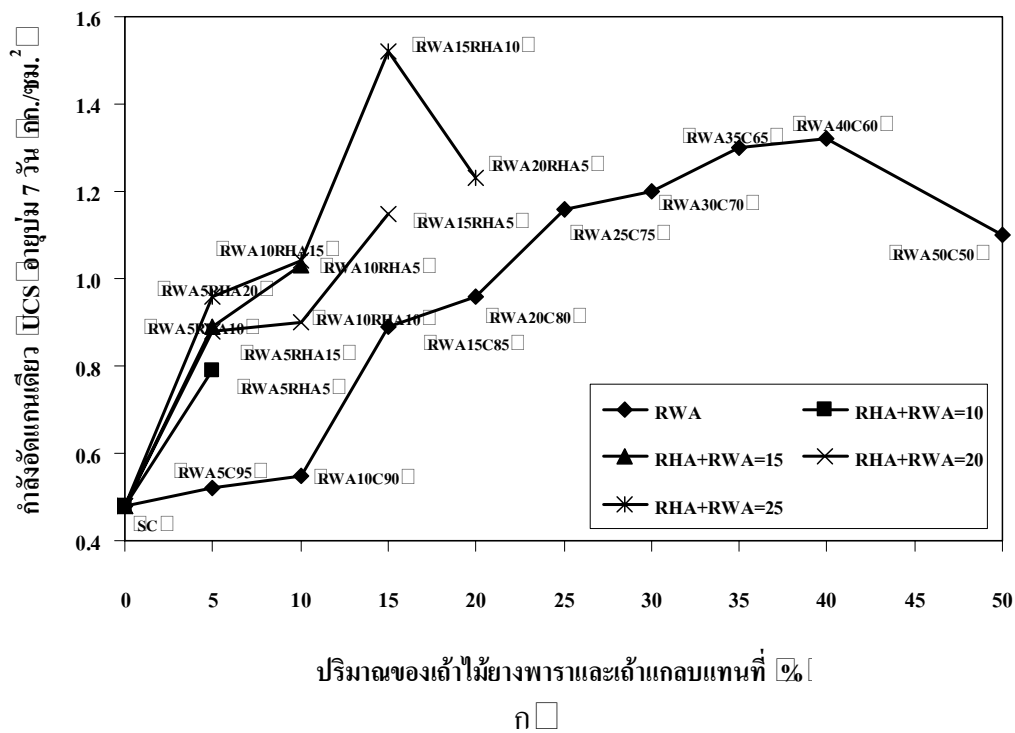
รูปที่ 4.13 ผลกระทบต่อการเติมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อกำลังอัดของดินปรับปรุงที่อายุบ่ม 1 วัน ก RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข RHA+RWA 30-50%



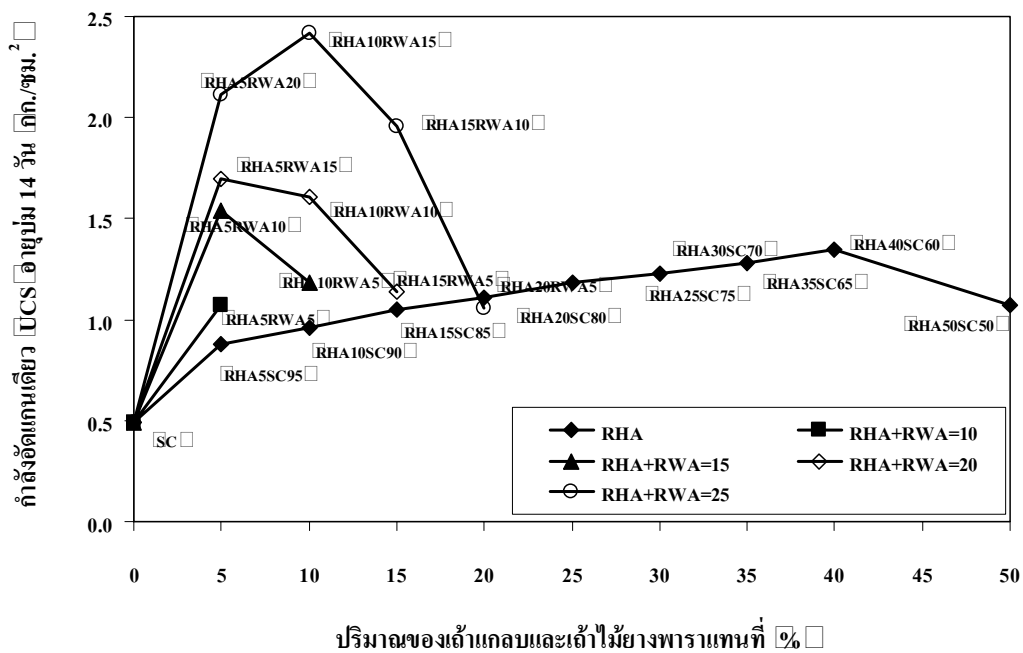
รูปที่ 4.14 ผลกระทบต่อการเติมแฉะไม่ยางพาราและแฉะกลับต่อกำลังอัดของดินปรับปรุงที่อายุบ่ม 1 วัน ก) RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข) RWA+RHA 30-50%



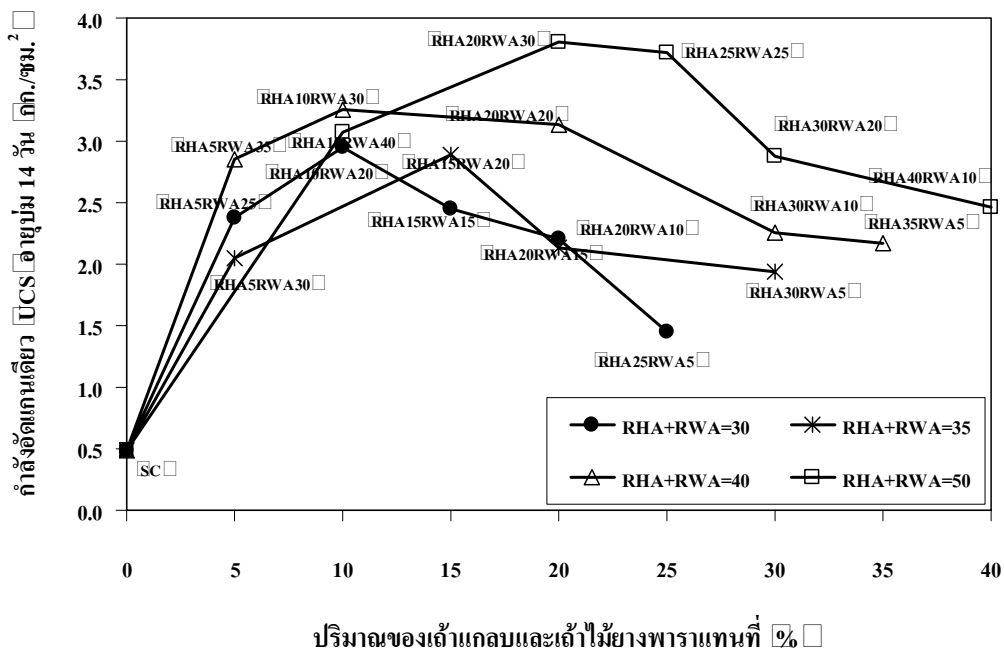
รูปที่ 4.15 ผลกระทบต่อการเติมเถ้ากลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อกำลังอัดของดินปรับปรุงที่อายุ บ่ม 7 วัน ก RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข RHA+RWA 30-50%



รูปที่ 4.16 ผลกระทบต่อการเติมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้ากลบต่อกำลังอัดของดินปรับปรุงที่อายุบ่ม 7 วัน ก RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข RWA+RHA 30-50%

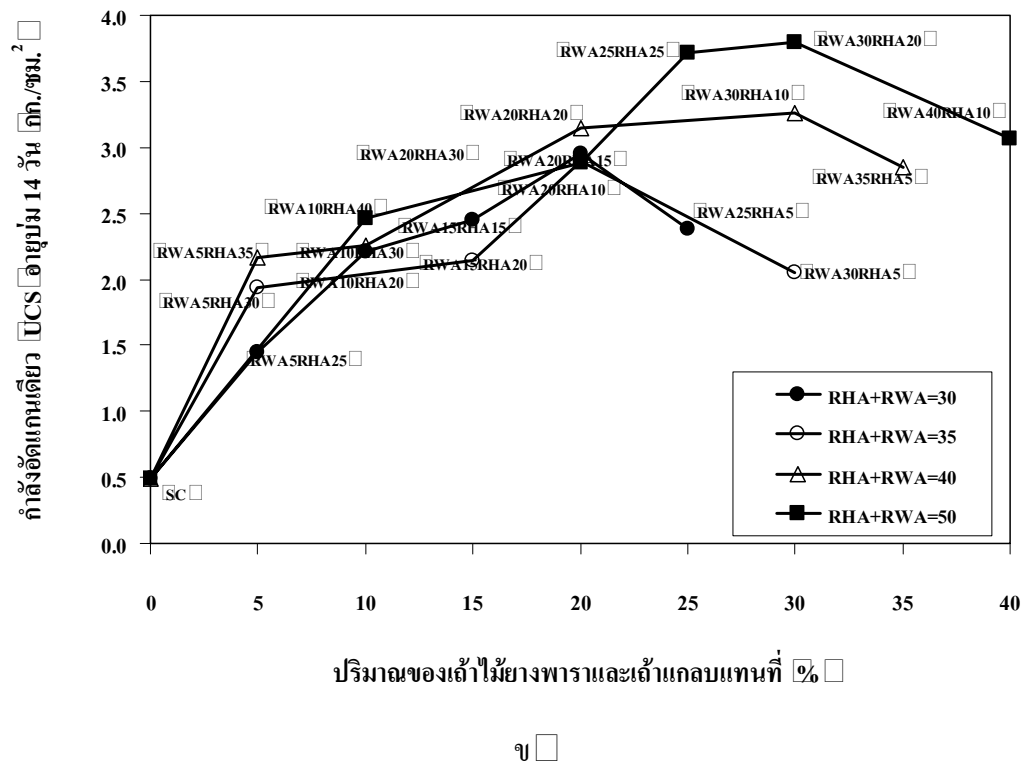
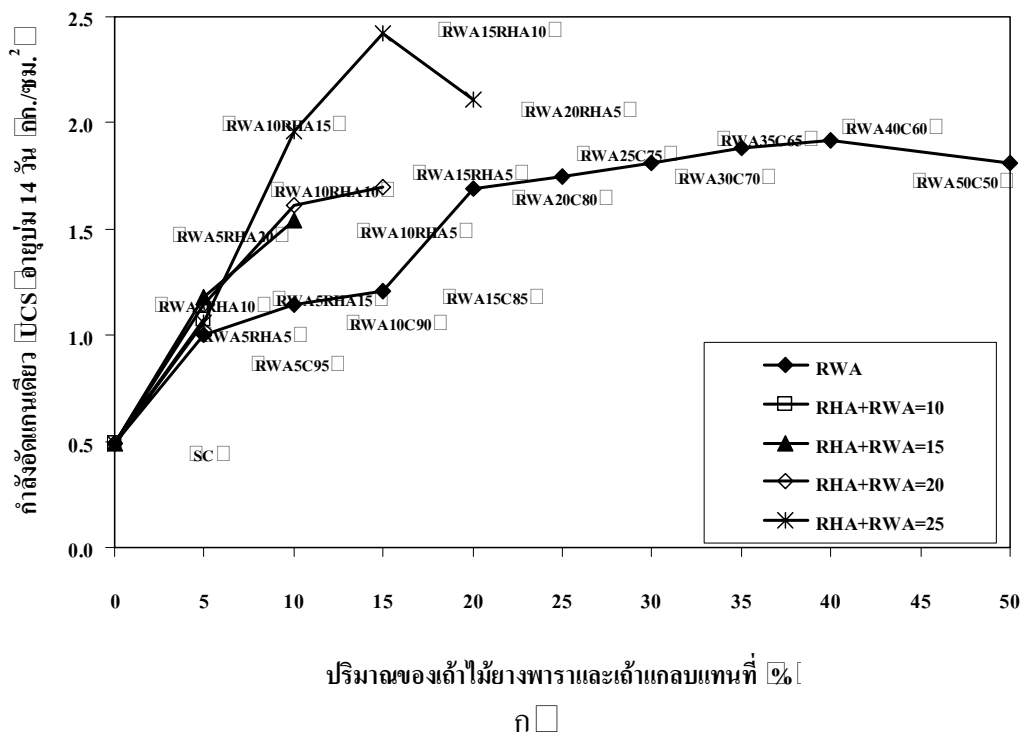


ก

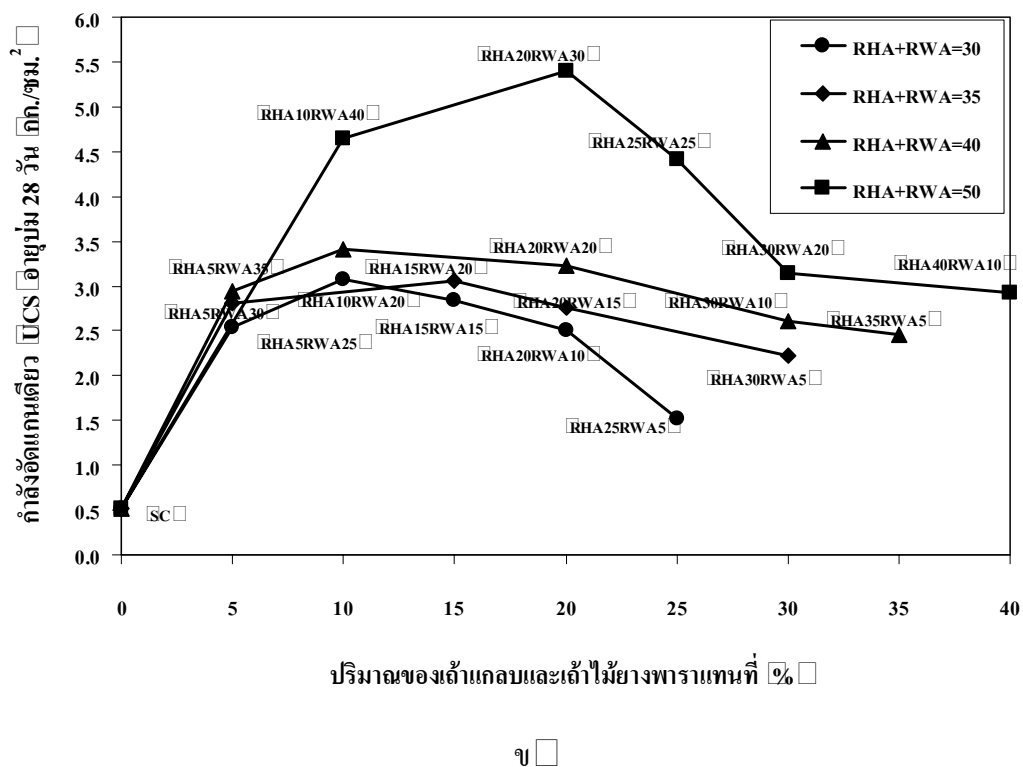
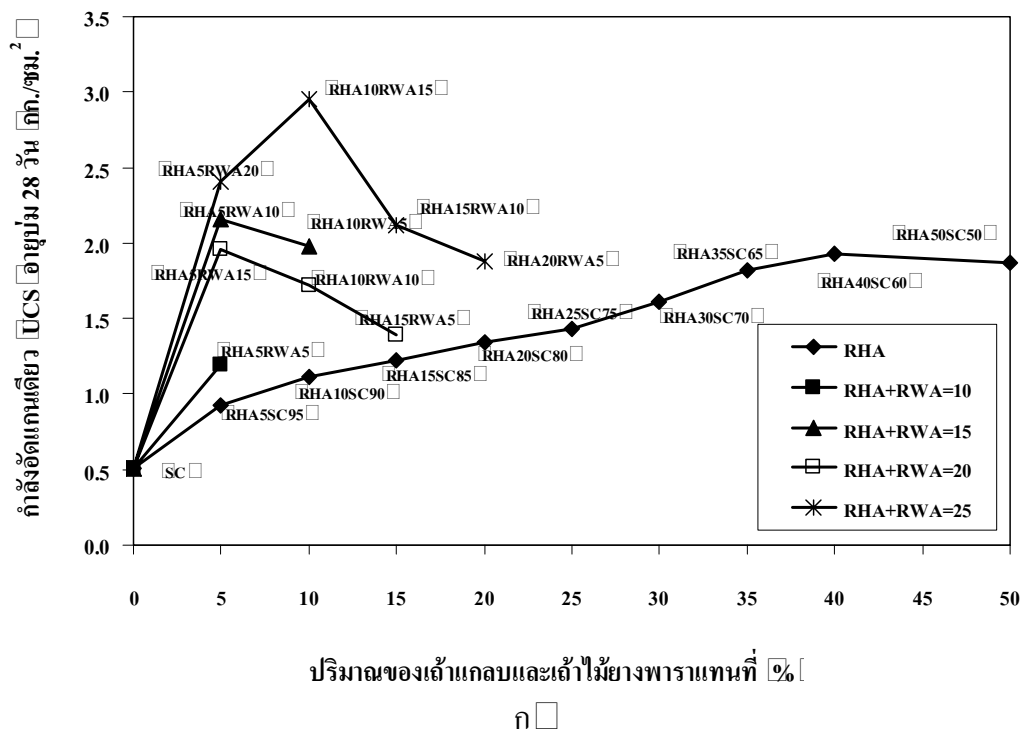


ข

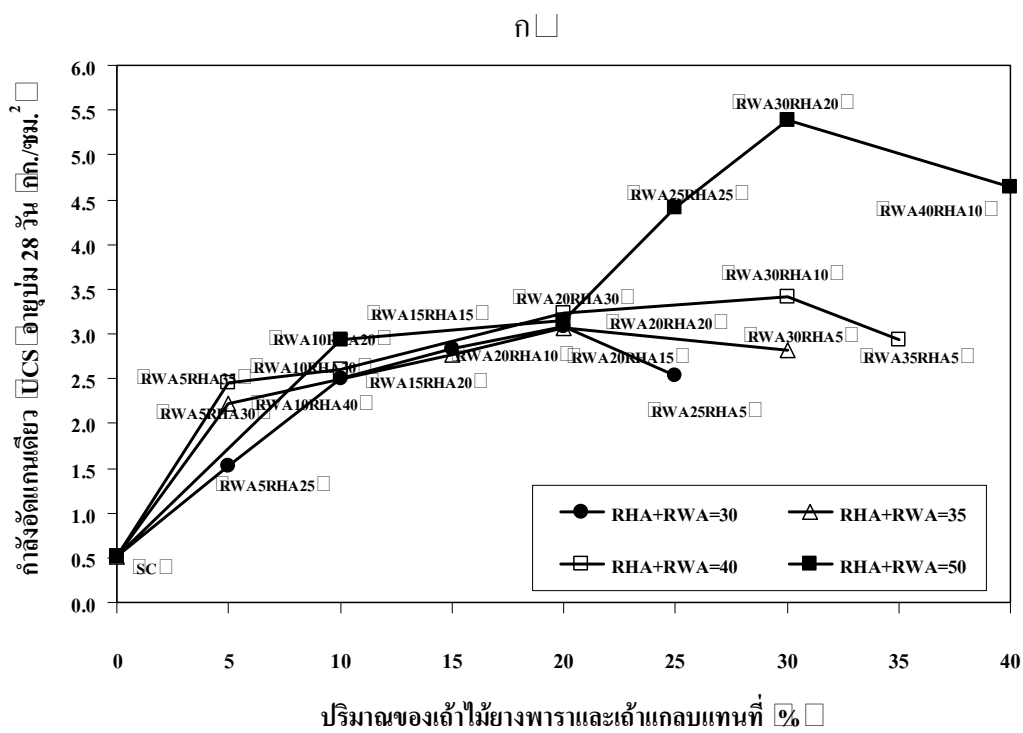
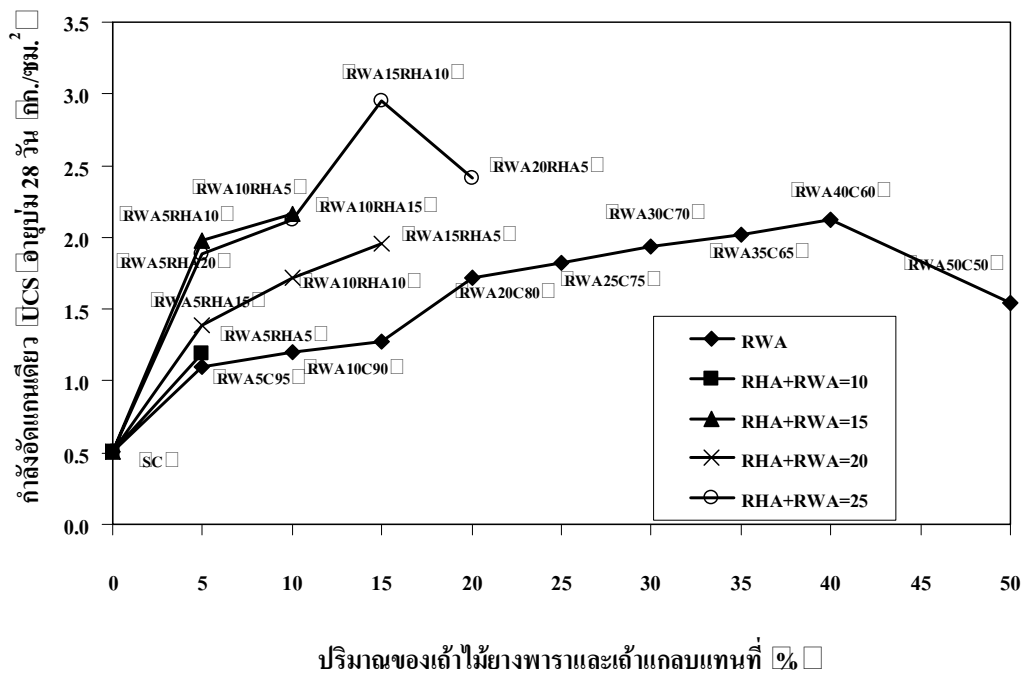
รูปที่ 4.17 ผลกระทบต่อการเติมเถ้ากลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อกำลังอัดของดินปรับปรุงที่อายุบ่ม 14 วัน ก RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข RHA+RWA 30-50%



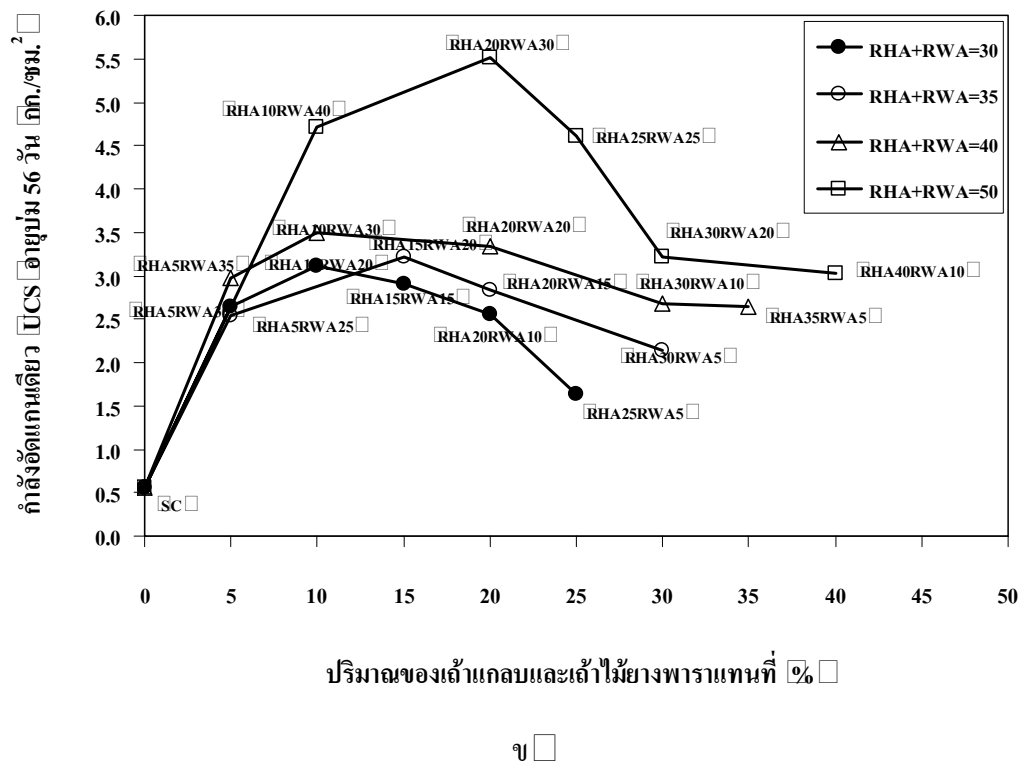
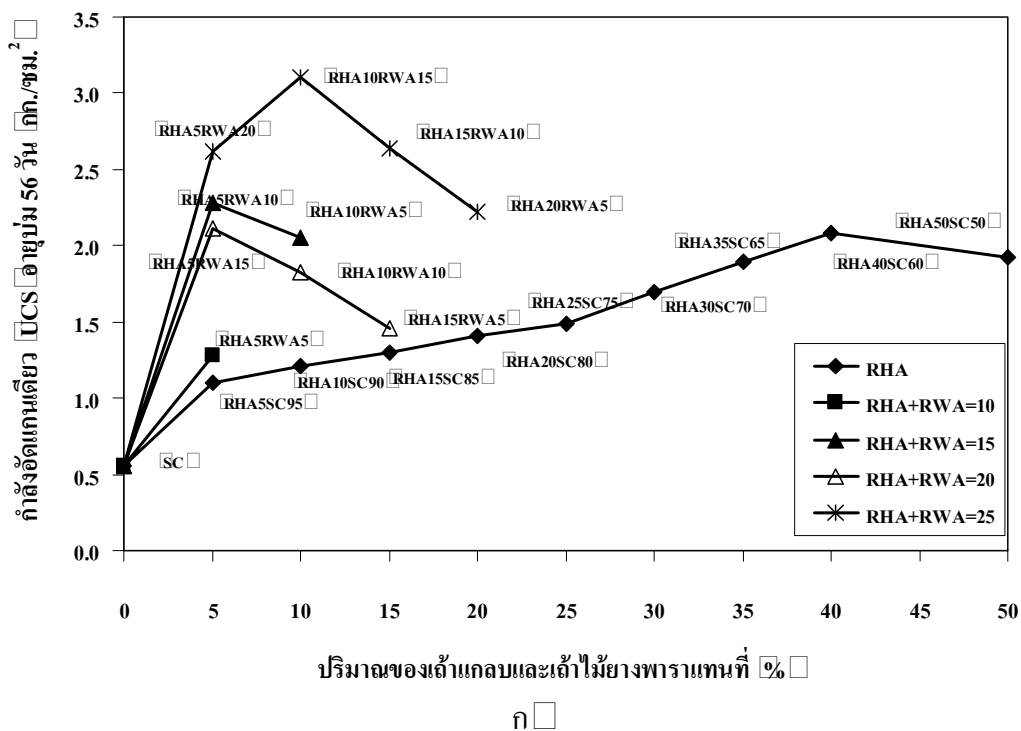
รูปที่ 4.18 ผลกระทบต่อการเติมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าแกลบต่อกำลังอัดของดินปรับปรุงที่อายุบ่ม 14 วัน ก RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข RWA+RHA 30-50%



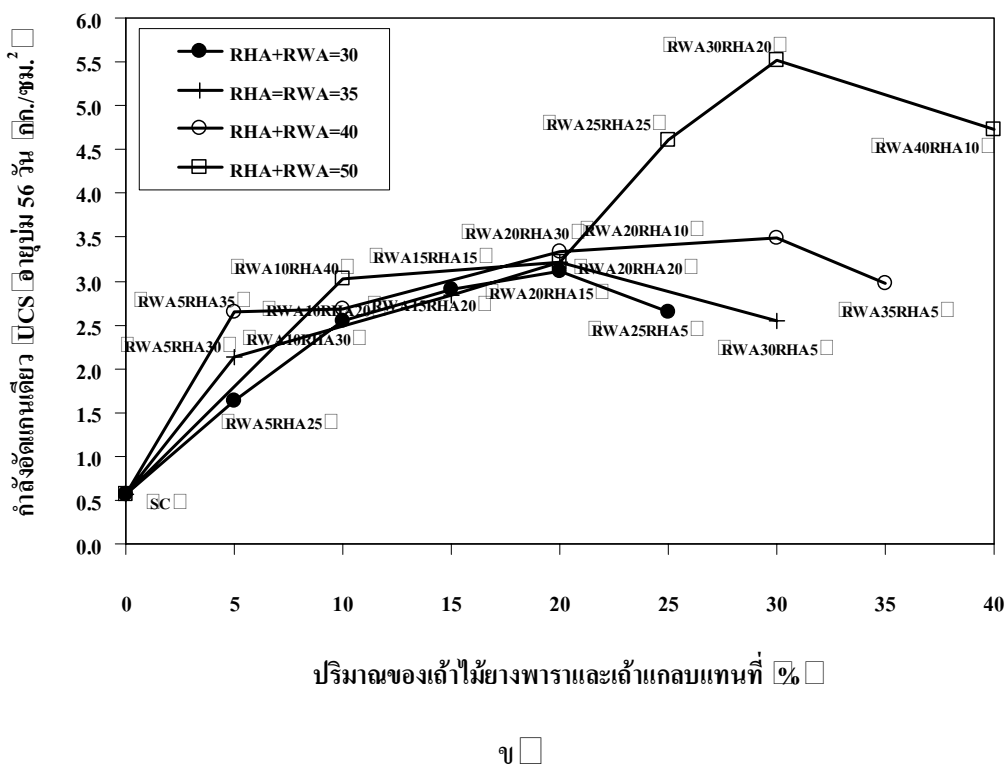
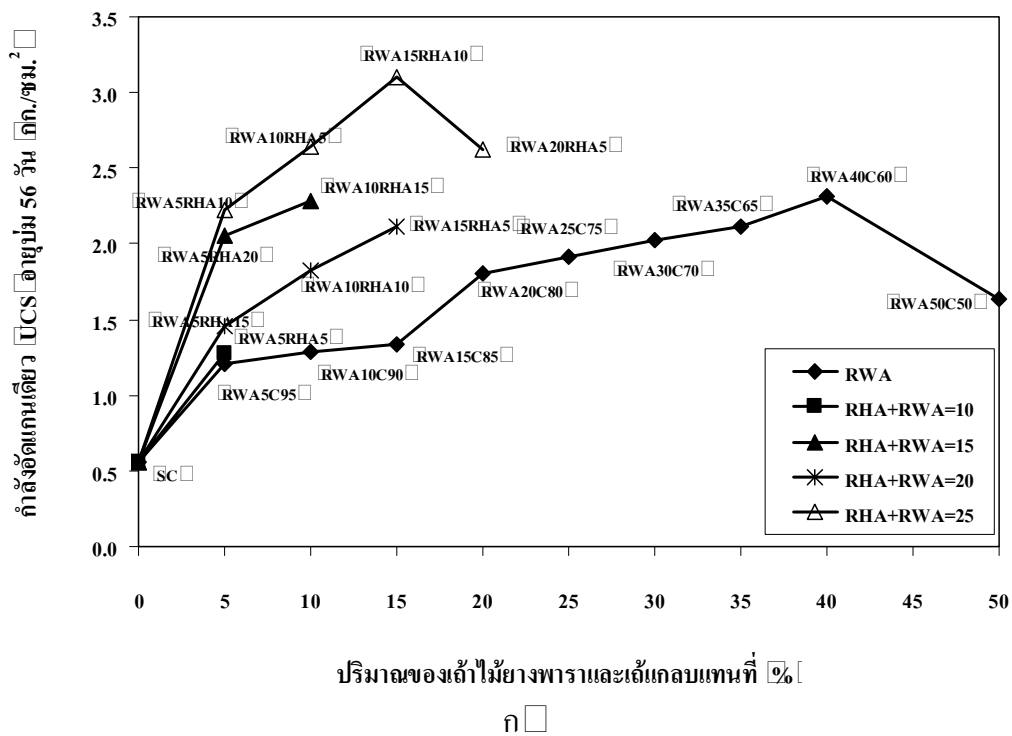
รูปที่ 4.19 ผลกระทบต่อการเติมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อกำลังอัดของดินปรับปรุงที่อายุบ่ม 28 วัน ก RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข RHA+RWA 30-50%



รูปที่ 4.20 ผลกระทบต่อการเติมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าไม้แกลบต่อกำลังอัดของดินปรับปรุงที่อายุบ่ม 28 วัน ก RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข RWA+RHA 30-50%



รูปที่ 4.21 ผลกระทบต่อการเติมเถ้ากลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อกำลังอัดของดินปรับปรุงที่อายุบ่ม 56 วัน ก RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข RHA+RWA 30-50%



รูปที่ 4.22 ผลกระทบต่อการเติมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้ากลบต่อกำลังอัดของดินปรับปรุงที่อายุ บ่ม 56 วัน ก RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข RWA+RHA 30-50%

4 □ อิทธิพลของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

จากผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว พบว่าดินเหนียวสงขลามีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50} □ ที่อายุการบ่ม 1 7 14 28 และ 56 วัน เท่ากับ 4.83 4.72 4.99 5.14 และ 5.16 กก./ซม.² ตามลำดับและอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนสงขลา คือ ปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบ 20% และเถ้าไม้ยางพารา 30% (RHA20RWA30 □ ส่งผลให้ค่ากำลังอัดสูงสุดและมีอัตราการพัฒนากำลังอัดอย่างชัดเจน โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุบ่ม 1 7 14 28 และ 56 วัน มีค่าเท่ากับ 17.95 100.65 178.01 249.46 และ 267.96 กก./ซม.² ตามลำดับ ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่อายุการบ่ม 1 7 14 และ 28 วัน ส่วนอายุบ่มที่ 56 วัน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มคงที่ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ผลวิเคราะห์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น กรณีของดินเหนียวสงขลาหลังจากปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา เมื่อพิจารณาเถ้าแกลบเพียงชนิดและผสมเถ้าทั้งสองชนิด พบว่าการผสมเถ้าแกลบส่งผลให้ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นที่ปริมาณการผสมเถ้าแกลบ 5% และให้ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูงสุดที่ปริมาณการผสมเถ้าแกลบที่ 20% แต่เมื่อปริมาณการผสมเถ้าแกลบเกิน 25% ขึ้นไป ส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลง ซึ่งมีแนวโน้มที่เหมือนกันในทุกอายุการบ่มดังแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.23 4.25 4.27 4.29 และรูปที่ 4.31 การเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแสดงถึงความแข็งของวัสดุ การผสมเถ้าแกลบส่งผลให้ดินเหนียวสงขลา มีความแข็งเพิ่มขึ้น แต่หากผสมเถ้าแกลบมากกว่า 20% จะส่งผลให้ความแข็งลดลง

สำหรับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ของดินเหนียวสงขลาหลังจากปรับปรุง เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าไม้ยางพาราเพียงชนิดและกรณีผสมเถ้าทั้งสองชนิด พบว่าการผสมเถ้าไม้ยางพารา ส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นที่ทุกอัตราส่วนผสม ซึ่งมีแนวโน้มที่เหมือนกันในทุกอายุการบ่มแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.24 4.26 4.28 4.30 และรูปที่ 4.32 การเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสยืดหยุ่น แสดงถึงความแข็งของวัสดุการผสมเถ้าไม้ยางพาราส่งผลให้ดินเหนียวสงขลา มีความแข็งเพิ่มขึ้น แต่หากผสมเถ้าไม้ยางพารามากกว่า 30% จะทำให้วัสดุเปราะและส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Basha et al. (2003 □ ได้กล่าวถึงอิทธิพลของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ ในการปรับปรุงดินเดิมให้มีความมั่นคง พบว่าการเพิ่มปริมาณของเถ้าแกลบในอัตราส่วนที่ 20% และปูนซีเมนต์ที่ 4% ให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสุดถ้าผสมเถ้าแกลบมากกว่า 20% ก็จะทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงด้วยเช่นเดียวกับค่ากำลังอัด

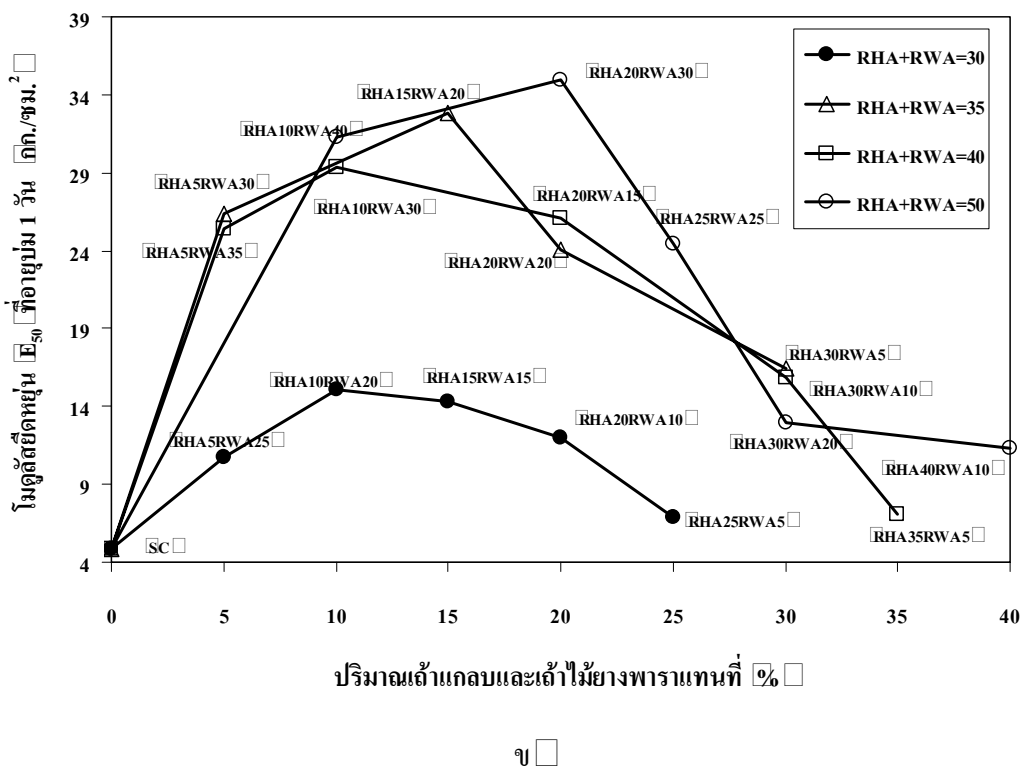
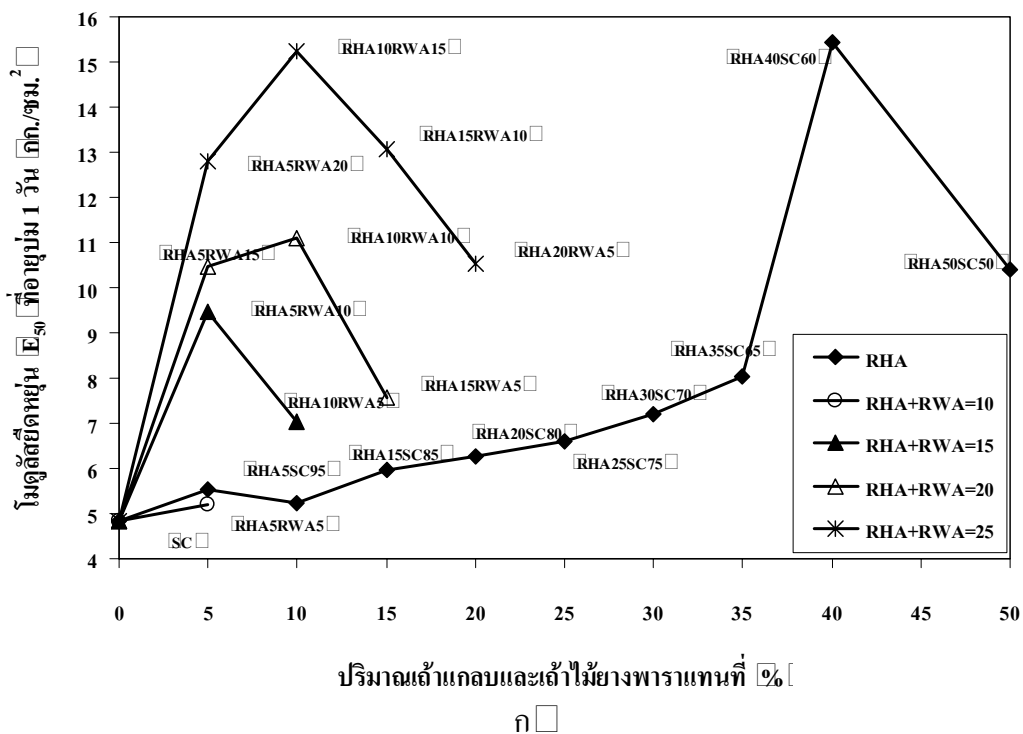
Kolias et al. (2005 □ ได้ดำเนินการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการใช้เถ้าลอยมีแคลเซียมและซีเมนต์มาปรับปรุงดินเหนียว พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีการพัฒนาค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าลอยมีแคลเซียมสูงที่ผสมเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ Lee et al. (2005 □ ได้กล่าวถึงอิทธิพลของ

ปูนซีเมนต์ต่อการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว โดยการนำปูนซีเมนต์มาปรับปรุงดินเหนียวจากน้ำทะเล ในสิงคโปร์ในอัตราส่วนต่างผสมต่างๆ ผลพบว่า อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และอัตราส่วนของดิน ต่อปูนซีเมนต์เป็นปัจจัยสำคัญต่อการเพิ่มค่ากำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

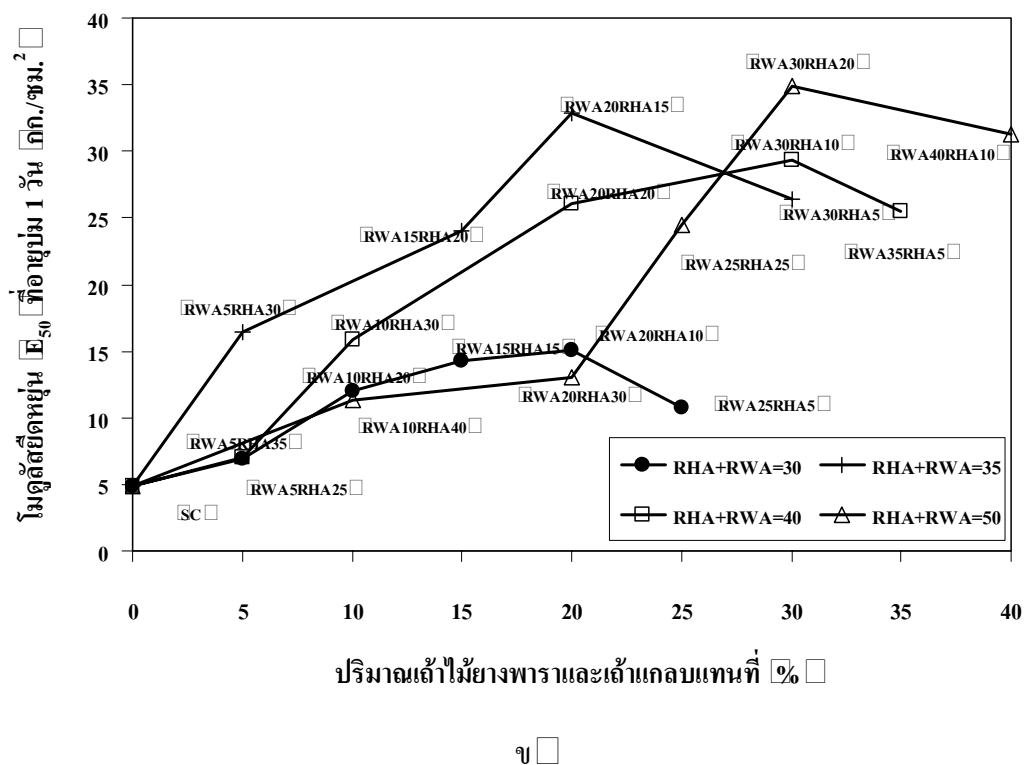
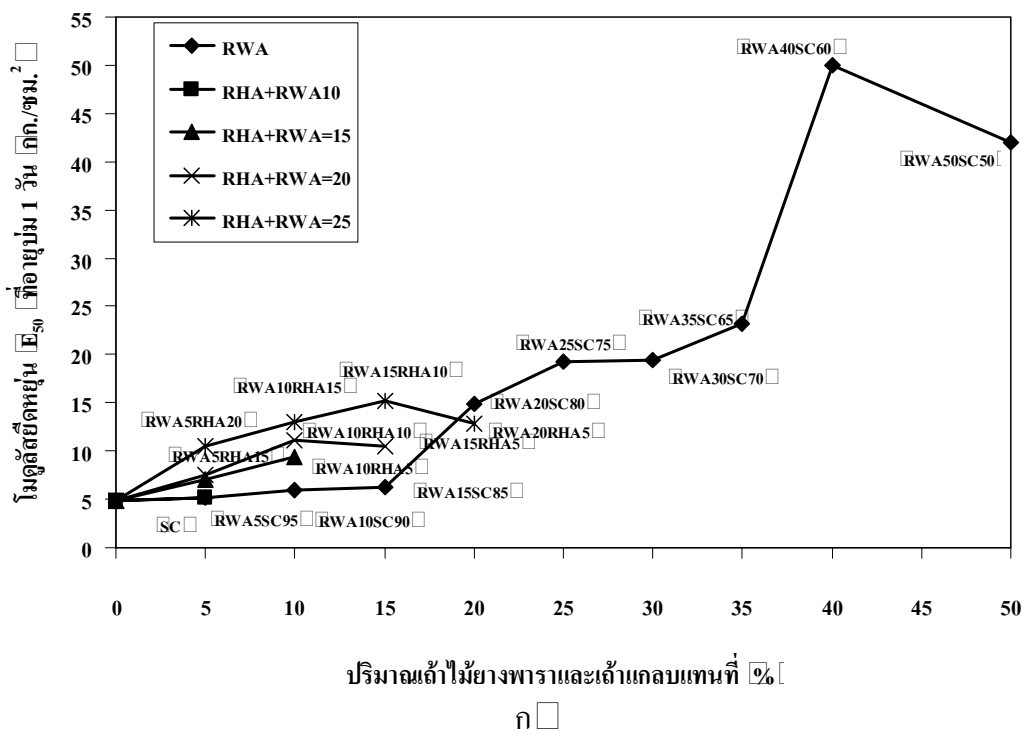
5 □ อิทธิพลของอายุการบ่มต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว พบว่าดินเหนียวสงขลามีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50} □) ที่ โดยอายุการบ่ม ไม่มีผลต่ออัตราการเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50} □) แต่กรณีของดินเหนียว สงขลา หลังจากปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราทุกอัตราส่วนมีอัตราการเพิ่มค่าของโมดูลัส ยืดหยุ่นอย่างชัดเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่อายุการบ่ม 1 7 14 และ 28 วัน โดยที่อายุการบ่ม ที่ 56 วัน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นค่าเริ่มจะคงที่ทุกอัตราส่วนการผสมดังตารางที่ 4.7 และจากรูปที่ 4.23 ถึง รูปที่ 4.32 ผลวิเคราะห์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น พบว่าการผสมเถ้าไม้ยางพาราในปริมาณมากจะทำให้ค่า โมดูลัสยืดหยุ่นสูงขึ้น ซึ่งเป็นอิทธิพลหลักของเถ้าไม้ยางพาราซึ่งสอดคล้องกับของเชาวนิย์ (2544 □) อธิบายถึงผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวกับระยะเวลาบ่ม จากการศึกษาการปรับปรุงดินเหนียว กรุงเทพฯ ด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ พบว่าเมื่อนำดินตัวอย่างที่หลังจากปรับปรุงคุณภาพไปบ่มที่ อายุต่างๆ คือ 3 7 14 และ 28 วัน ส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น

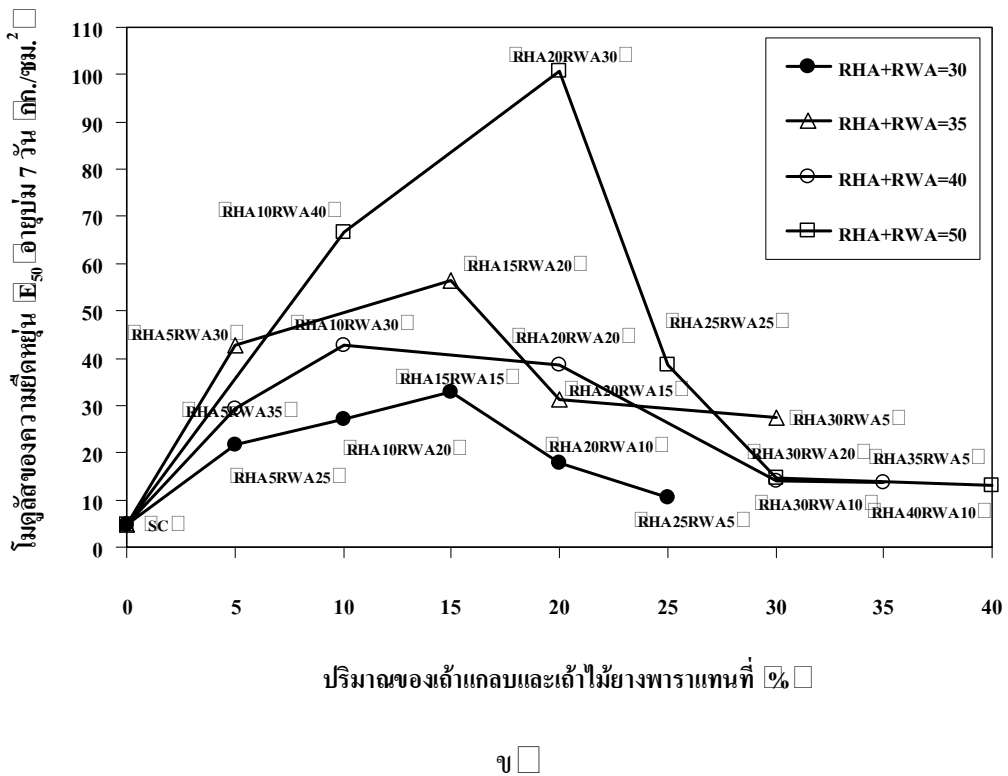
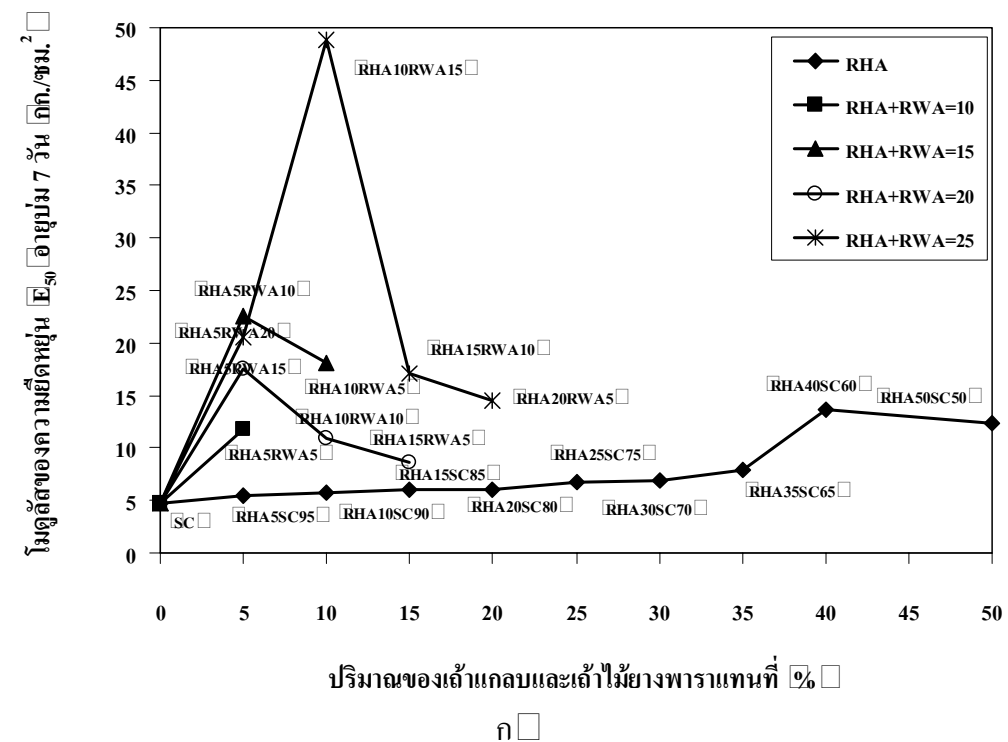
ศิษฐพร (2551 □) กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังอัดแกนเดียวกับอายุการ บ่ม จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของดินเหนียวปากพางด้วยเถ้าไผ่ปาล์ม น้ำมัน และ ไม้ยางพารา พบว่าเมื่อนำดินตัวอย่างหลังปรับปรุงสมบัติแล้วหลังจากบ่มที่อายุบ่มต่างๆ กัน คือ 1 7 14 28 และ 56 วัน ส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มและมีแนวโน้มเหมือนกันทุกอัตราส่วนผสม



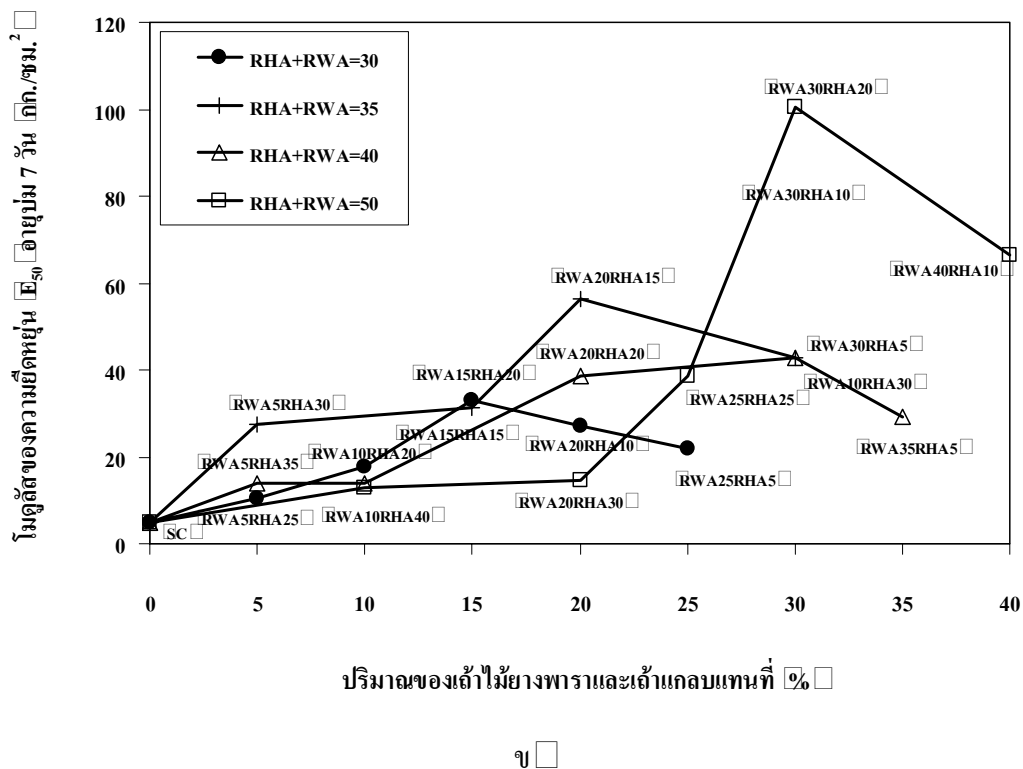
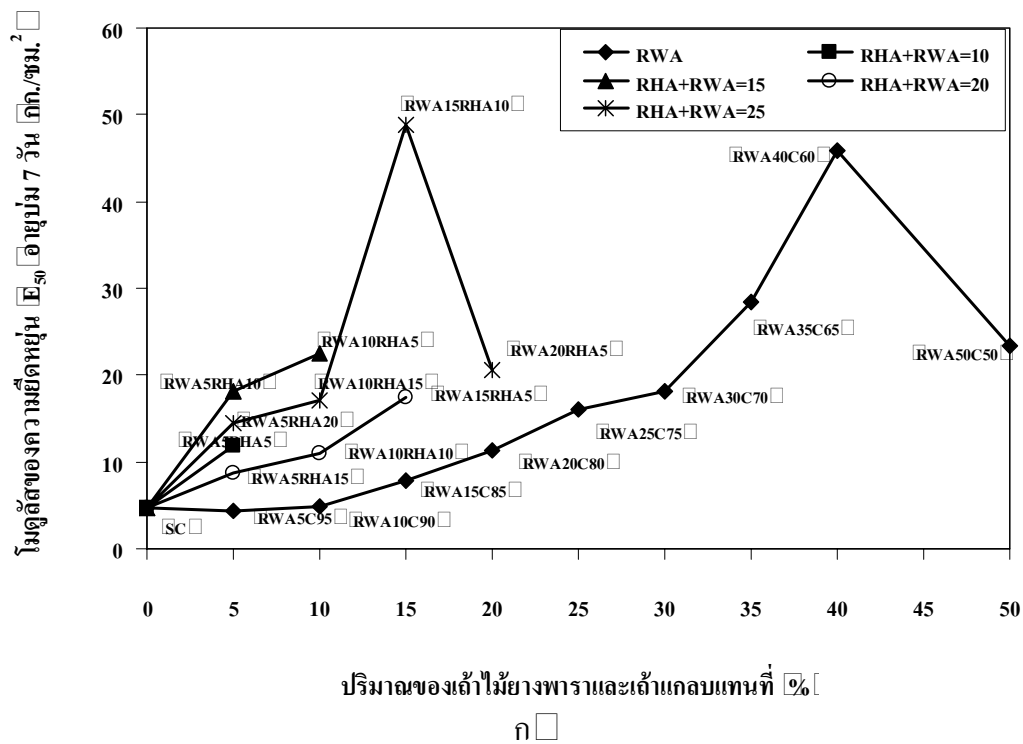
รูปที่ 4.23 พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราที่อายุบ่ม 1 วัน ก RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข RHA+RWA 30-50%



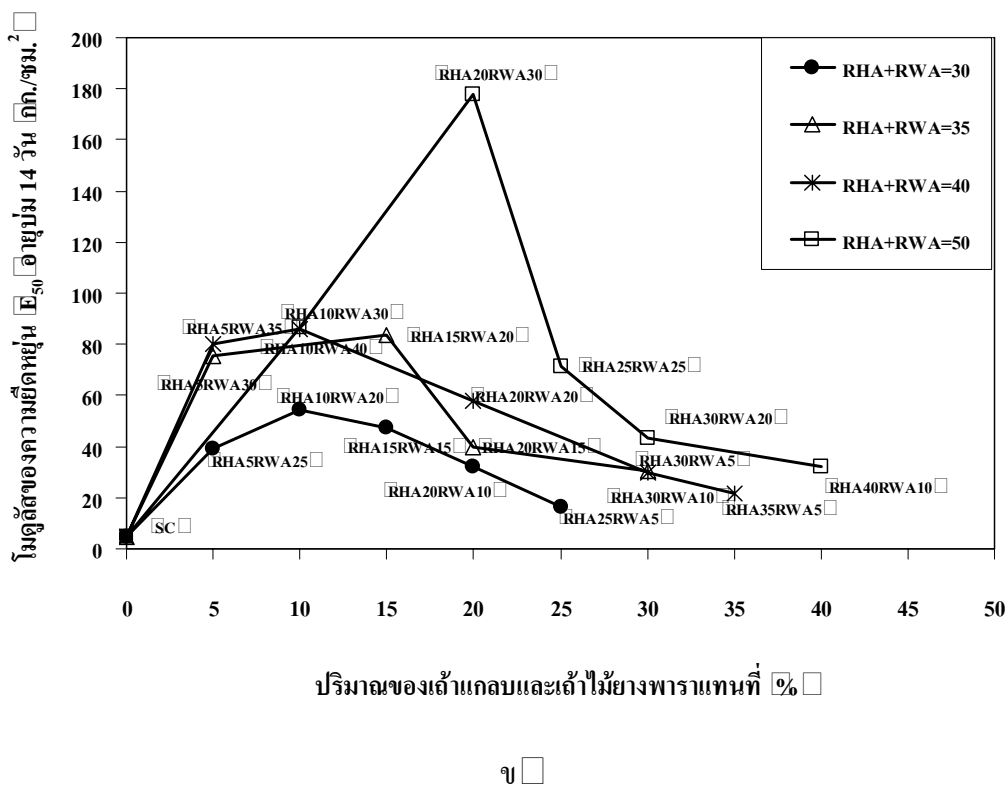
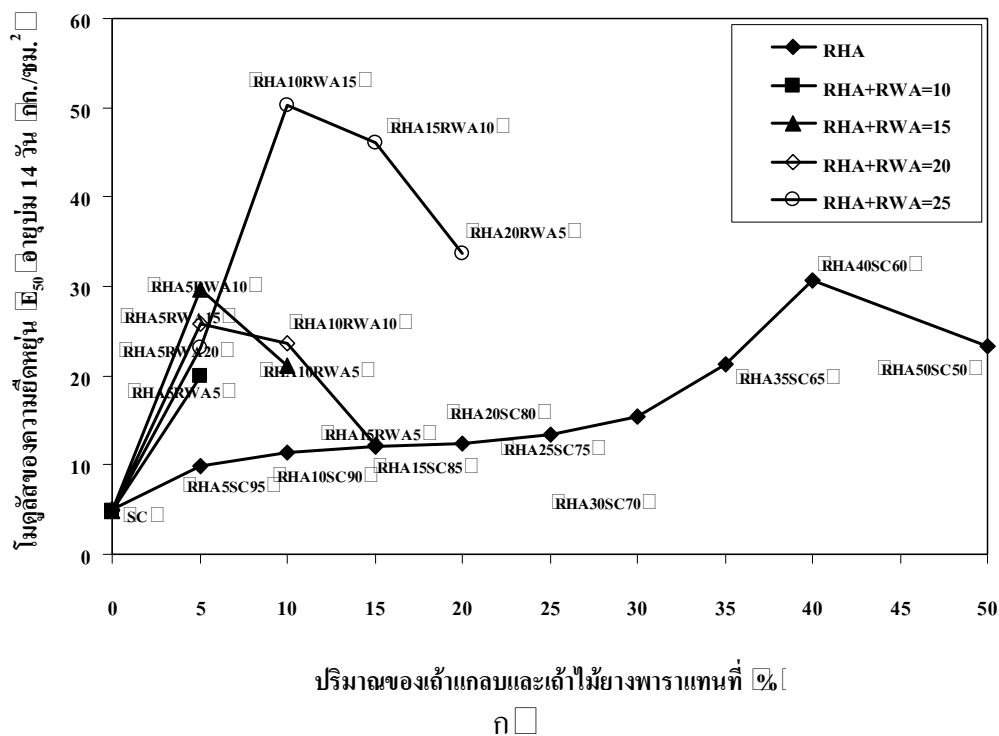
รูปที่ 4.24 พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมถั่วไม้ยางพาราและถั่วกลบที่อายุบ่ม 1 วัน ก RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข RWA+RHA 30-50%



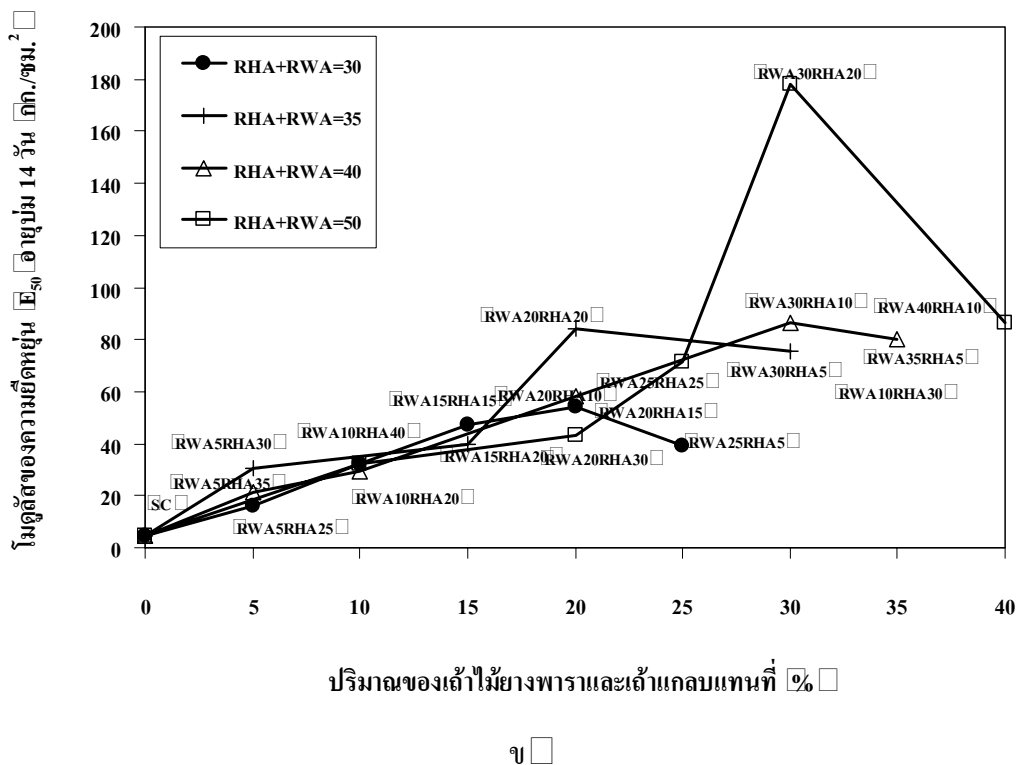
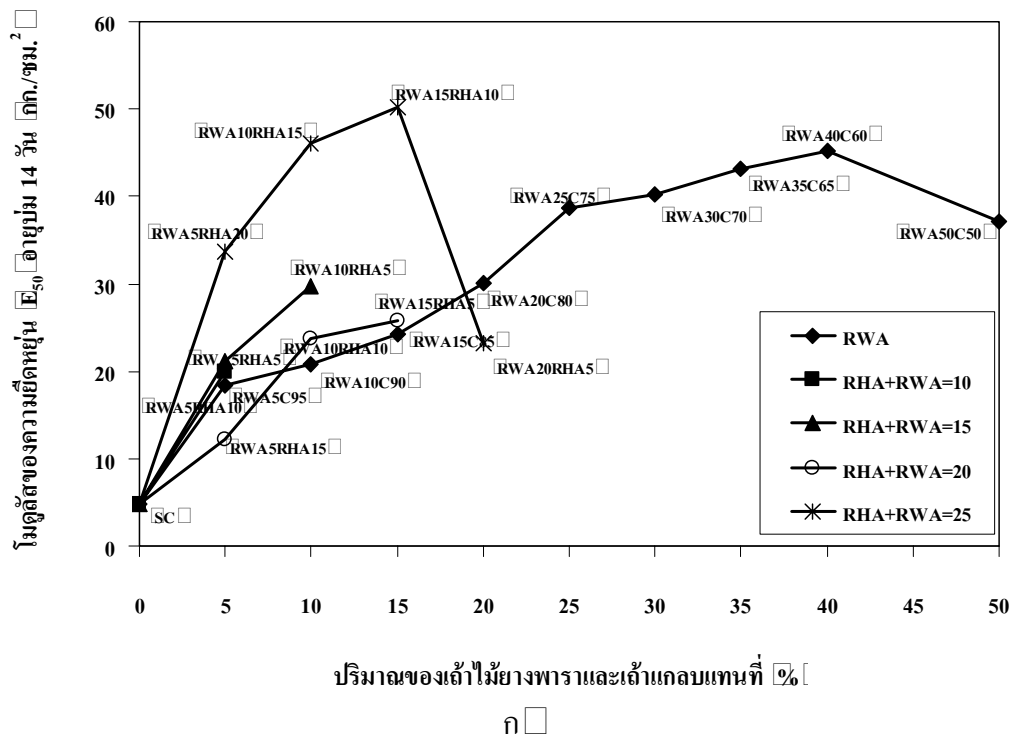
รูปที่ 4.25 พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราที่อายุบ่ม 7 วัน ก) RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข) RHA+RWA 30-50%



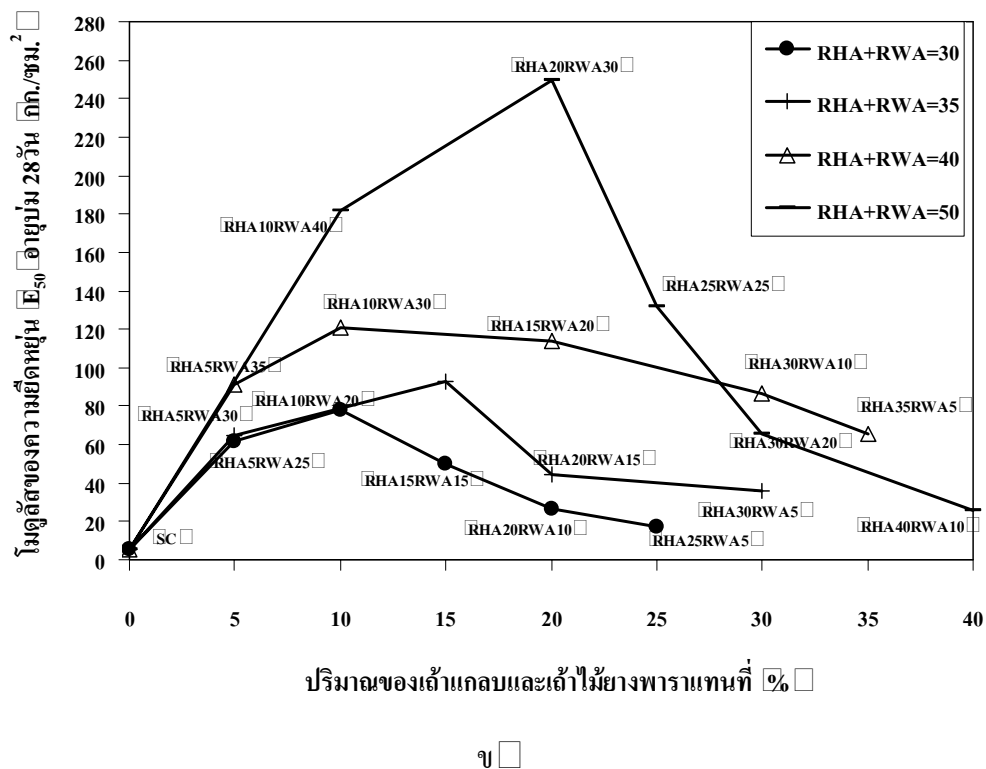
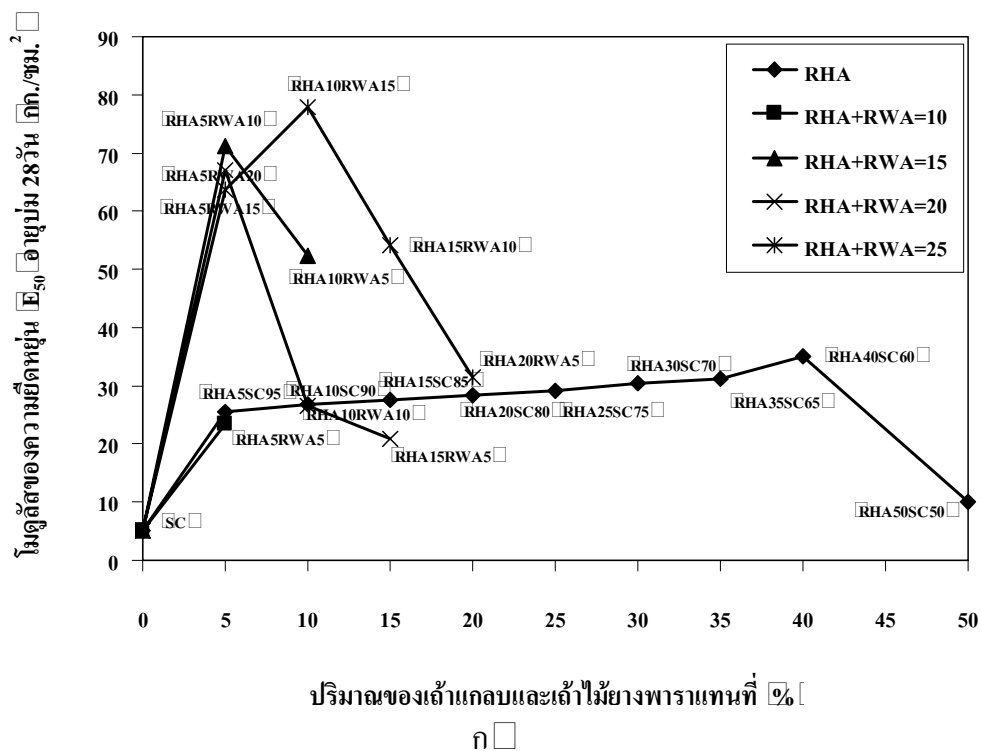
รูปที่ 4.26 พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมหญ้าฟางพาราและเถ้าแกลบที่อายุบ่ม 7 วัน ก) RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข) RWA+RHA 30-50%



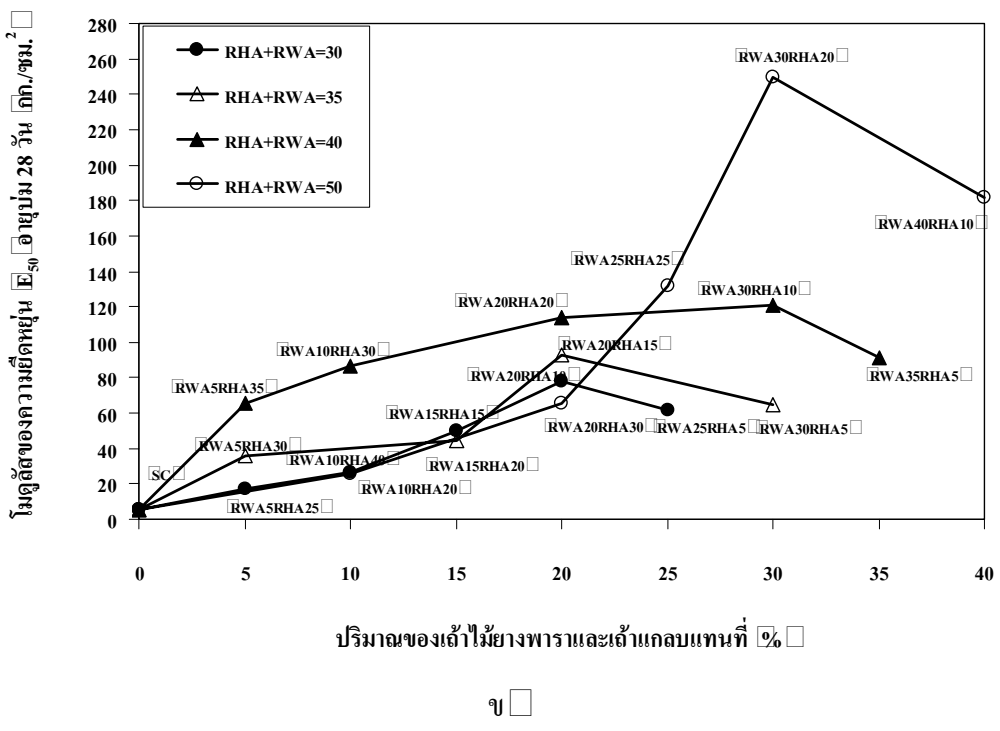
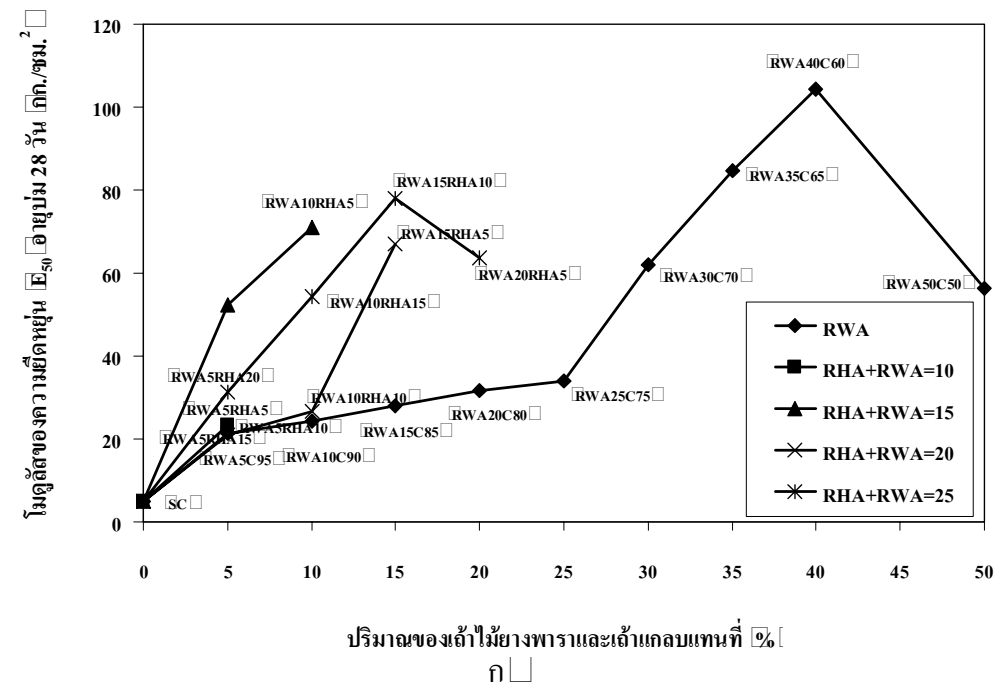
รูปที่ 4.27 พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราที่อายุบ่ม 14 วัน ก RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข RHA+RWA 30-50%



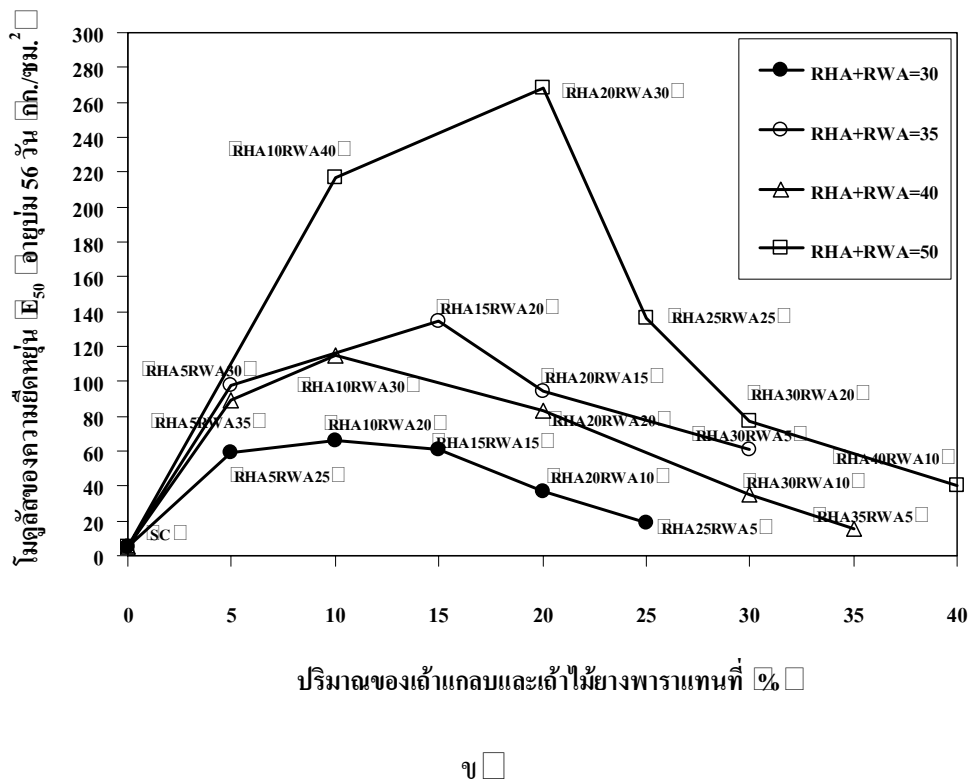
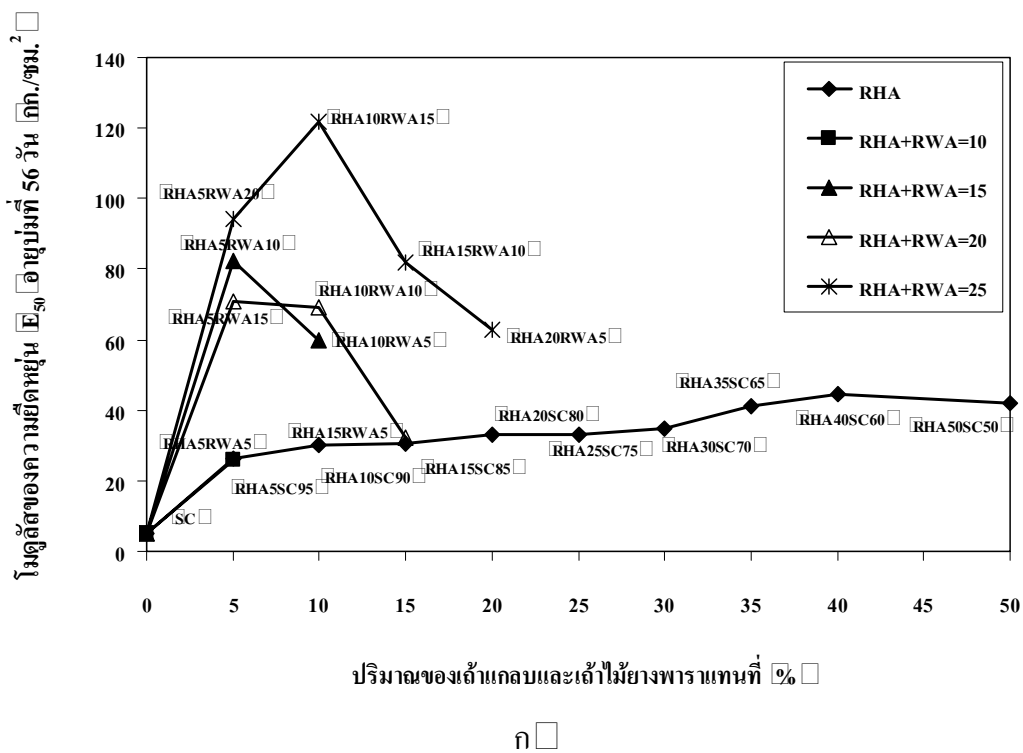
รูปที่ 4.28 พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมปุ๋ยหมักและปุ๋ยคอกแทนที่อายุบ่ม 14 วัน ก RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข RWA+RHA 30-50%



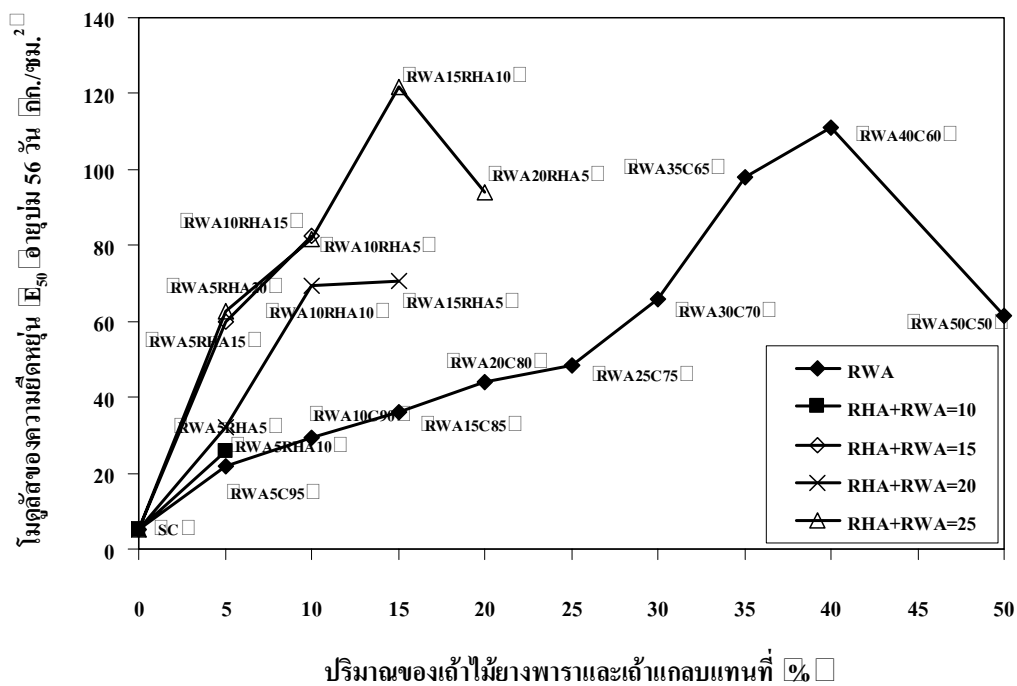
รูปที่ 4.29 พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราที่อายุบ่ม 28 วัน ก RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข RHA+RWA 30-50%



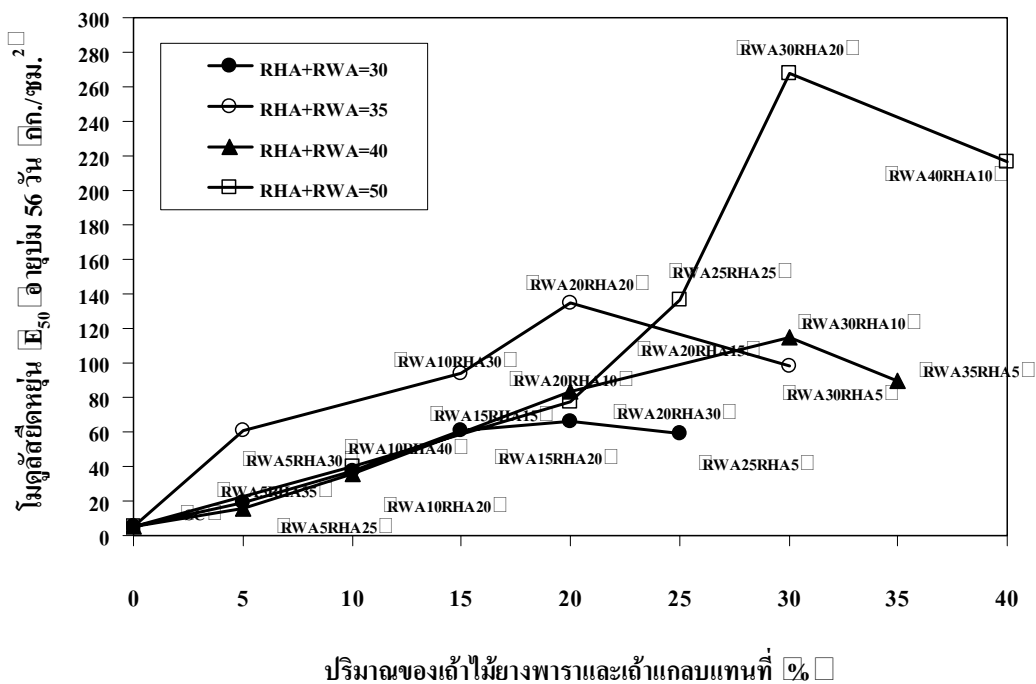
รูปที่ 4.30 พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราที่อายุบ่ม 28 วัน ก RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข RHA+RWA 30-50%



รูปที่ 4.31 พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมปุ๋ยคอกและปุ๋ยหมักแทนที่อายุบ่ม 56 วัน ก RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข RHA+RWA 30-50%



ก



ข

รูปที่ 4.32 พฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในดินที่ผสมปุ๋ยคอกและปุ๋ยหมักในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน อายุบ่ม 56 วัน ก) RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข) RWA+RHA 30-50%

6 □ อิทธิพลของปริมาณเถาเถาและเถาไม้ยางพาราต่อค่าความเครียดที่จุดวิบัติ

ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (UCT □พบว่าดินเหนียวสงขลามีค่าความเครียดที่จุดวิบัติ (ϵ_r □ที่อายุการบ่ม 1 7 14 28 และ 56 วัน เท่ากับ 12.88 12.68 12.71 12.80 และ 12.84 % ซึ่งค่ากำลังอัดมีแนวโน้มคงที่ กรณีของดินเหนียวสงขลาหลังจากผสมด้วยเถาเถา 20% และเถาไม้ยางพารา 30% ส่งผลให้มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดและมีอัตราการพัฒนากำลังอัดอย่างชัดเจน โดยมีค่าความเครียดที่จุดวิบัติที่อายุการบ่ม 1 7 14 28 และ 56 วัน เท่ากับ 10.46 9.01 6.22 2.97 และ 2.04 % ซึ่งค่าความเครียดที่จุดวิบัติมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนที่อายุการบ่ม 1 7 14 และ 28 วัน โดยที่อายุการบ่มที่ 56 วัน ค่าความเครียดที่จุดวิบัติเริ่มจะคงที่ดังตารางที่ 4.7

ผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดที่จุดวิบัติ กรณีของดินเหนียวสงขลาหลังจากผสมด้วยเถาเถาและเถาไม้ยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถาเถา โดยแทนที่เถาเถาเพียงชนิดเดียวในอัตราส่วนที่ 5-50% พบว่าการผสมเถาเถาในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความเครียดที่จุดวิบัติเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นของเถาเถาและเมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถาทั้งสองชนิด โดยที่กรณีเถาเถาแทนที่ในปริมาณที่น้อยกว่า เท่ากับและมากกว่าเถาไม้ยางพารา พบว่าการผสมเถาเถาในอัตราส่วนที่ 5% แรกของอัตราส่วนผสมของเถาทั้งสองชนิด ส่งผลให้ค่าความเครียดที่จุดวิบัติลดลงเล็กน้อยแต่เมื่อผสมปริมาณของเถาเถาเพิ่มขึ้นกลับส่งผลให้ค่าความเครียดที่จุดวิบัติเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งมีแนวโน้มที่เหมือนกันในทุกอายุการบ่มดังรูปที่ 4.33 การเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดที่จุดวิบัติ แสดงถึงความเหนียวของวัสดุ การผสมเถาเถาส่งผลให้ดินเหนียวสงขลามีความเหนียวเพิ่มขึ้นและช่วยทำให้วัสดุไม่แข็งจนเปราะเหมือนกับการผสมเถาไม้ยางพารา

ผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดที่จุดวิบัติกรณีของดินเหนียวสงขลาหลังจากผสมด้วยเถาเถาและเถาไม้ยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถาไม้ยางพารา พบว่าการผสมเถาไม้ยางพาราส่งผลให้ค่าความเครียดที่จุดวิบัติลดลงทุกปริมาณการผสมเถาไม้ยางพารา ซึ่งมีแนวโน้มที่เหมือนกันในทุกอายุการบ่มดังในรูปที่ 4.34 การลดลงของค่าความเครียดที่จุดวิบัติ แสดงถึงค่าความเหนียวของวัสดุลดลง เนื่องการผสมเถาไม้ยางพาราส่งผลให้เนื้อดินเหนียวสงขลามีความเปราะแต่กลับทำให้ดินเหนียวสงขลามีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับของดิษฐ์พร (2551 □ได้ค่าความเครียดที่จุดวิบัติของดินปากพนังปรับปรุงมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ถ้าผสมเถาไม้ยางพาราชนิดเดียวเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความเครียดที่จุดวิบัติลดลง นอกจากนี้ไชวานีย์ (2544 □พบว่า การผสมปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ส่งผลให้ค่าความเครียดที่จุดวิบัติของดินเหนียวกรุงเทพลดลง แต่เมื่อผสมเถาเถาด้วย พบว่าทำให้ค่าความเครียดที่จุดวิบัติเพิ่มขึ้นและค่าได้เพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถาเถาที่ผสมในดินเพิ่มขึ้นเช่นกัน

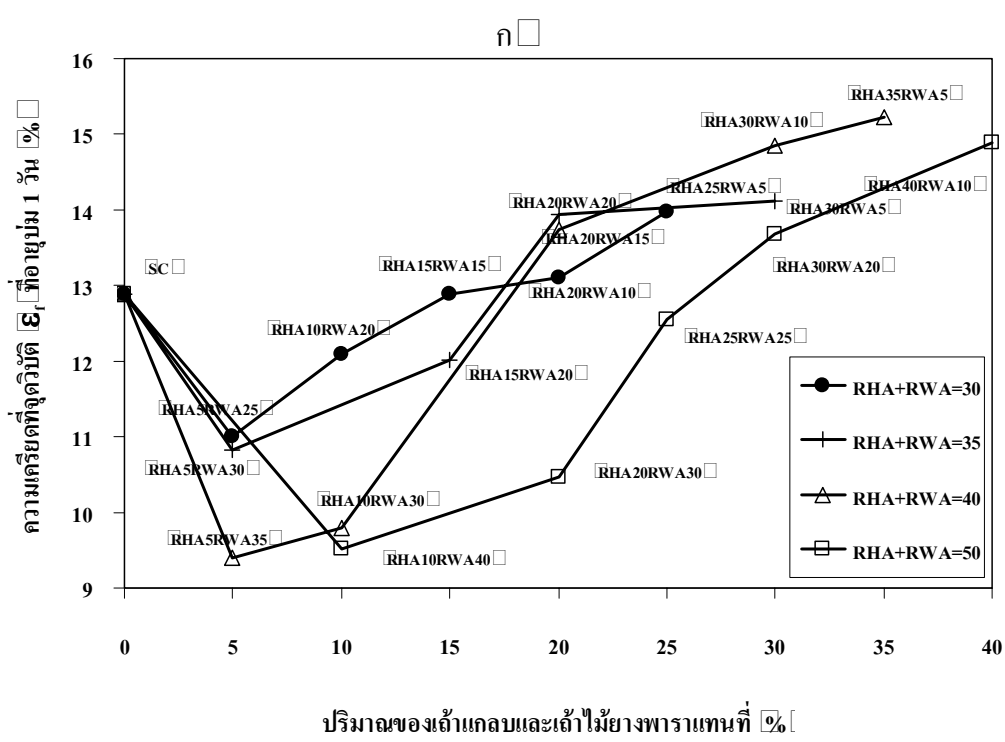
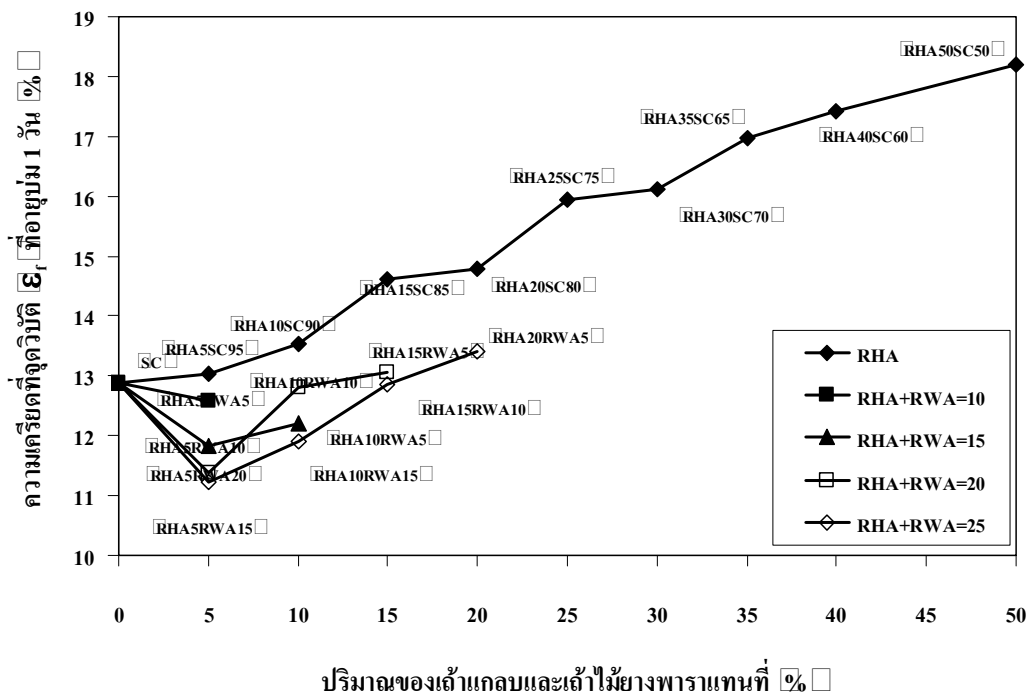
Lin et al. (2007 □พบว่า การผสมปูนขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความเครียดที่จุดวิบัติมีค่าลดลง แต่ถ้าเพิ่มปริมาณของเถาจากเต้าน้ำมันมากขึ้นและปริมาณที่มากกว่า

ปูนขาว ส่งผลให้ค่าของค่าความเครียดที่จุดวิบัติมีค่าเพิ่มมากขึ้นและยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Chen et al. (2009) อธิบายผลการทดสอบการแรงอัดสามแกนจากการศึกษาการปรับปรุงดินเดิมด้วย เถ้าตะกอนเตาน้ำมันและปูนซีเมนต์ ผลพบว่าค่าความเครียดที่จุดวิบัติมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้าตะกอนเตาน้ำมันมากขึ้นแต่ค่าความเครียดที่จุดวิบัติมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น

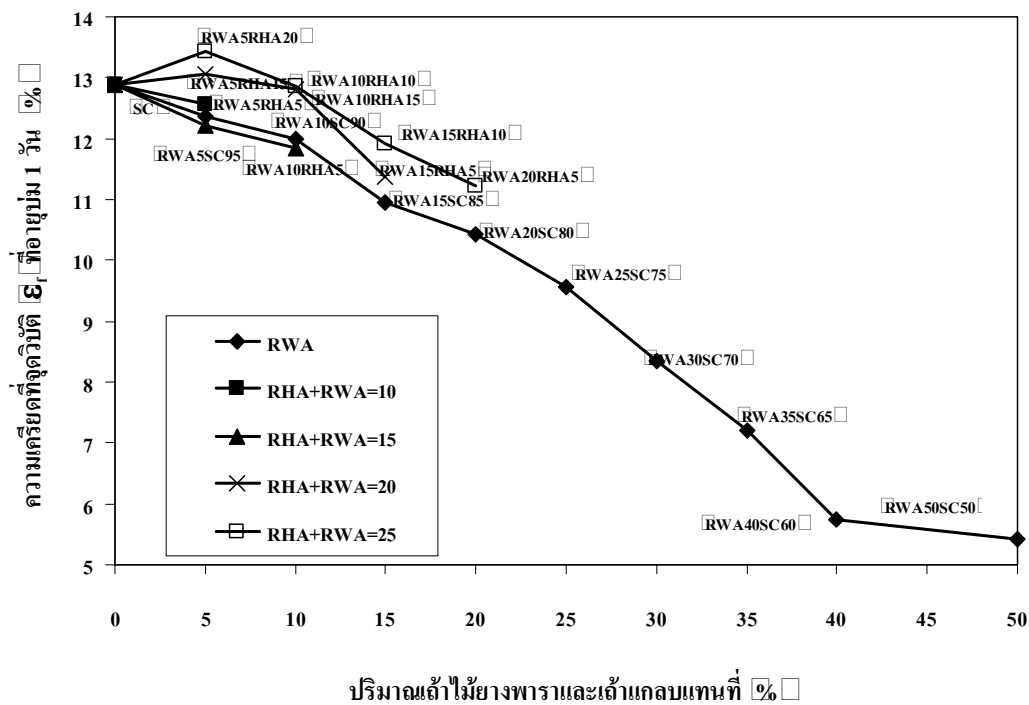
7 อธิทธิพลของอายุการบ่มต่อค่าความเครียดที่จุดวิบัติ

ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว พบว่าดินเหนียวสงขลา มีค่าความเครียดที่จุดวิบัติ (ϵ_r) บ่มคงที่ตลอดอายุการบ่ม แต่กรณีของดินเหนียวสงขลาหลังจากปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบ และเถ้าไม้ยางพาราทุกอัตราส่วนมีอัตราการลดลงของค่าความเครียดที่จุดวิบัติอย่างชัดเจน มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนที่อายุการบ่ม 1 7 14 และ 28 วัน โดยที่อายุการบ่มที่ 56 วัน ค่าความเครียดที่จุดวิบัติค่าเริ่มจะคงที่ทุกอัตราส่วนการผสมดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.33 ถึงรูปที่ 4.42 จากการวิเคราะห์ค่าค่าความเครียดที่จุดวิบัติ พบว่าการผสมเถ้าแกลบในปริมาณมากจะทำให้ค่าความเครียดที่จุดวิบัติสูงขึ้น ซึ่งเป็นอิทธิพลหลักของเถ้าแกลบแต่ในทางตรงข้ามถ้าผสมเถ้าไม้ยางพาราในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความเครียดที่จุดวิบัติลดลงเมื่อวิเคราะห์เถ้าไม้ยางพาราเป็นอิทธิพลหลัก ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของคิษฐพร (2551) ได้กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความเครียดที่จุดวิบัติกับอายุการบ่มของดินเหนียวปากพนังปรับปรุงด้วยเถ้าเถ้าปาล์ม น้ำมัน และ ไม้ยางพาราที่อายุบ่ม 1 7 14 28 และ 56 วัน พบว่าระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความเครียดที่จุดวิบัติลดลงตามอายุการบ่ม โดยเฉพาะอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดคือ เถ้าเถ้าปาล์ม น้ำมัน 10% และเถ้าไม้ยางพารา 10% ค่าลดลงจาก 5% ถึง 30% และมีแนวโน้มเหมือนกันทุกอัตราส่วนผสม

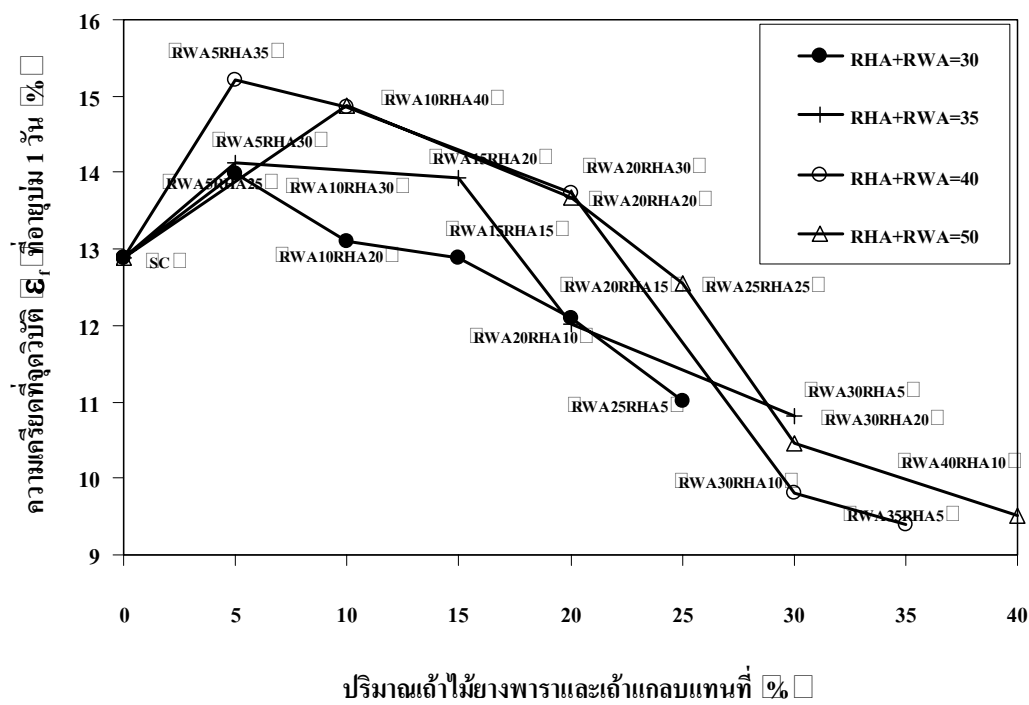
เชาวนีย์ (2544) ได้อธิบายถึงค่าความเครียดที่จุดวิบัติกับระยะเวลาบ่ม ซึ่งการผสมปูนซีเมนต์ในดินเหนียวกรุงเทพ โดยนำตัวอย่างมาบ่มที่อายุ 3 7 14 และ 28 วันพบว่าที่อายุกันมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความเครียดที่จุดวิบัติลดลง



รูปที่ 4.33 ผลกระทบของดินที่เติมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อความเครียดที่จุดวัดที่อายุบ่ม 1 วัน ก RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข RHA+RWA 30-50%

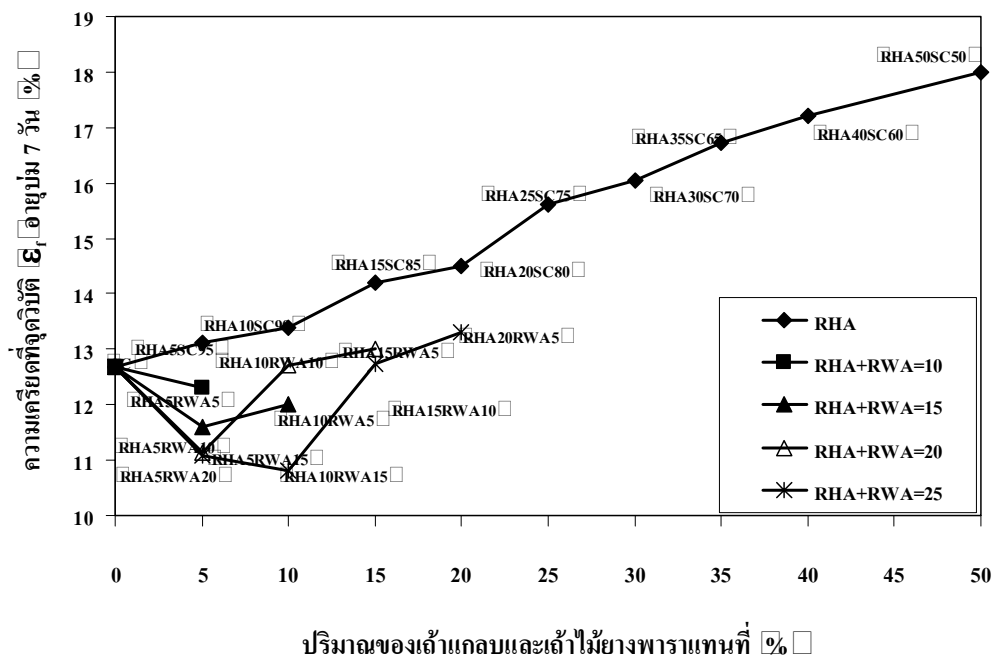


ก

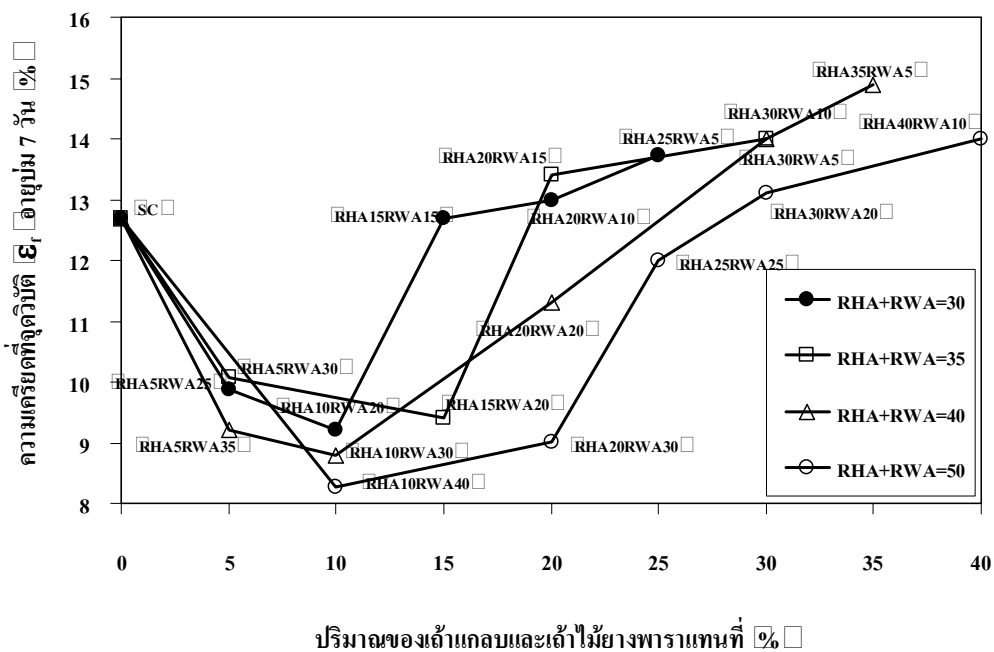


ข

รูปที่ 4.34 ผลกระทบของดินที่เติมถ้าไม่ยางพาราและถ้ากลบต่อค่าความเคียดที่จุดวัดที่อายุบ่ม 1 วัน ก RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข RWA+RHA 30-50%

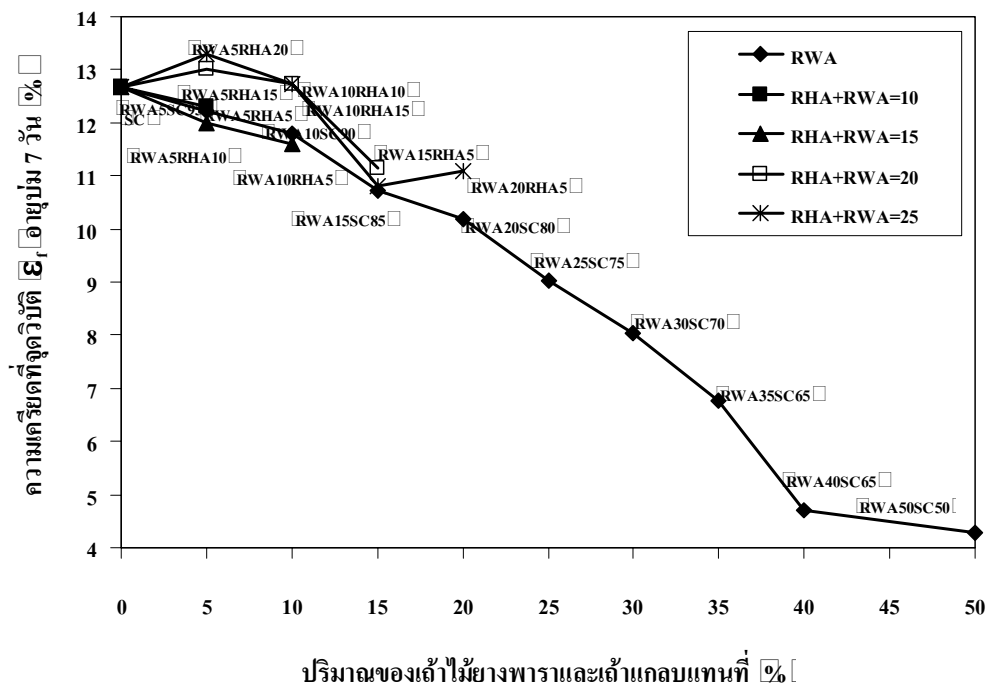


ก

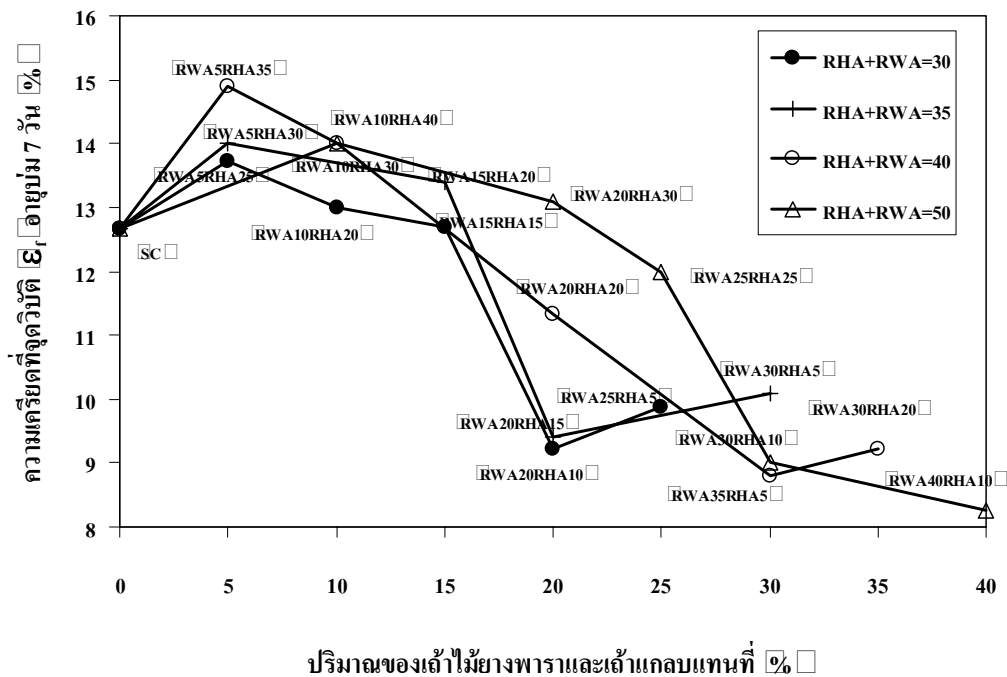


ข

รูปที่ 4.35 ผลกระทบของดินที่เติมเถ้าแกลบและเถ้าไม้อย่างพาราต่อความเครียดที่จุดวิกฤติที่อายุบ่ม 7 วัน ก RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข RHA+RWA 30-50%

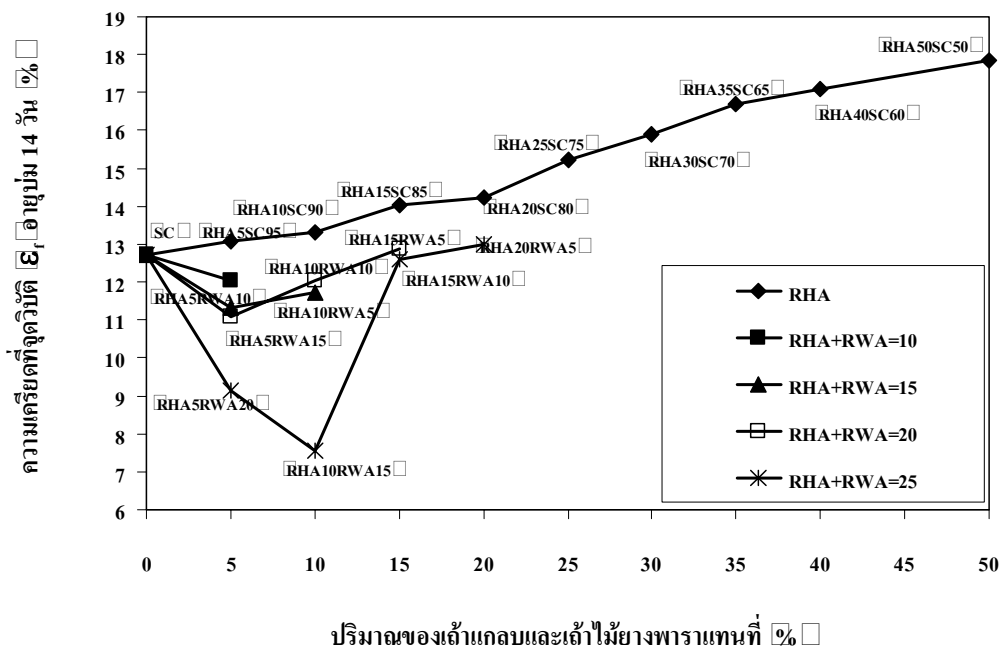


ก □

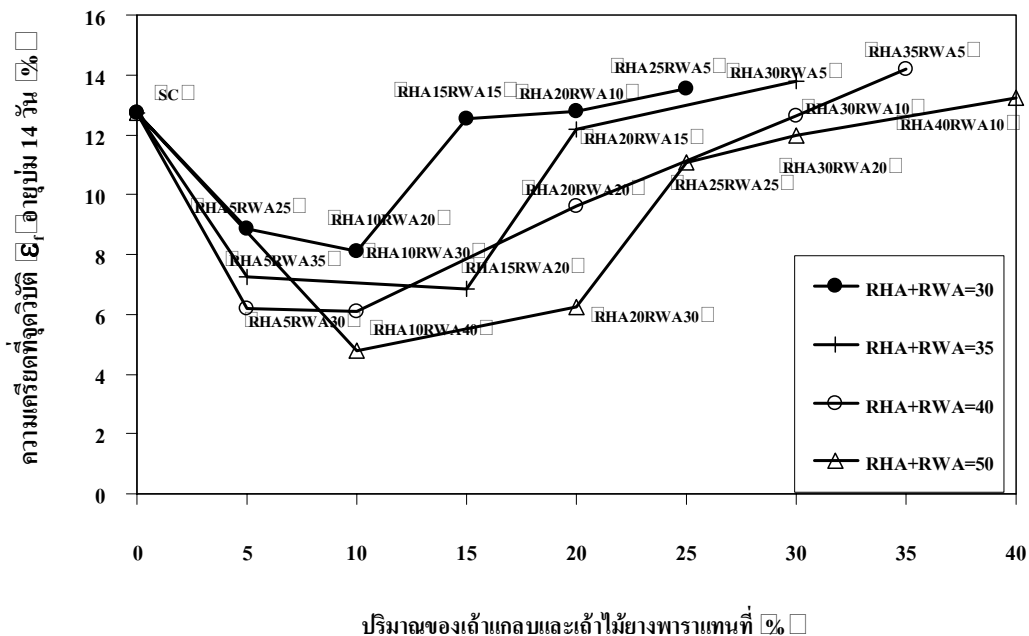


ข □

รูปที่ 4.36 ผลกระทบของดินที่เติมปุ๋ยและดินแทนที่ต่อความเครียดที่จุดวิบัติที่อายุบ่ม 7 วัน ก □ RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข □ RHA+RWA 30-50%

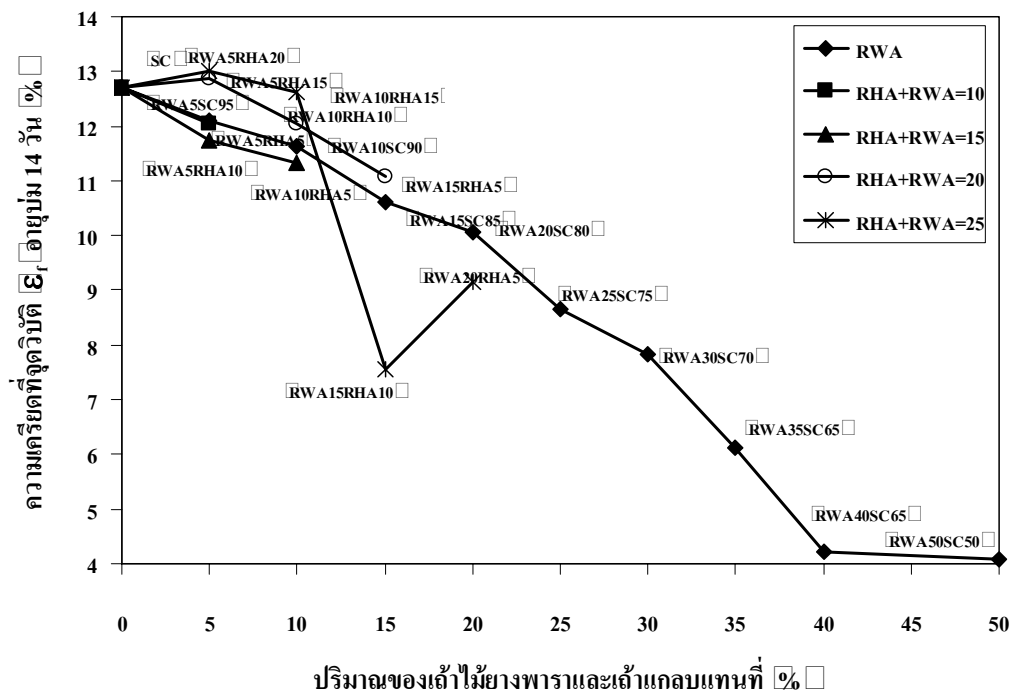


ก □

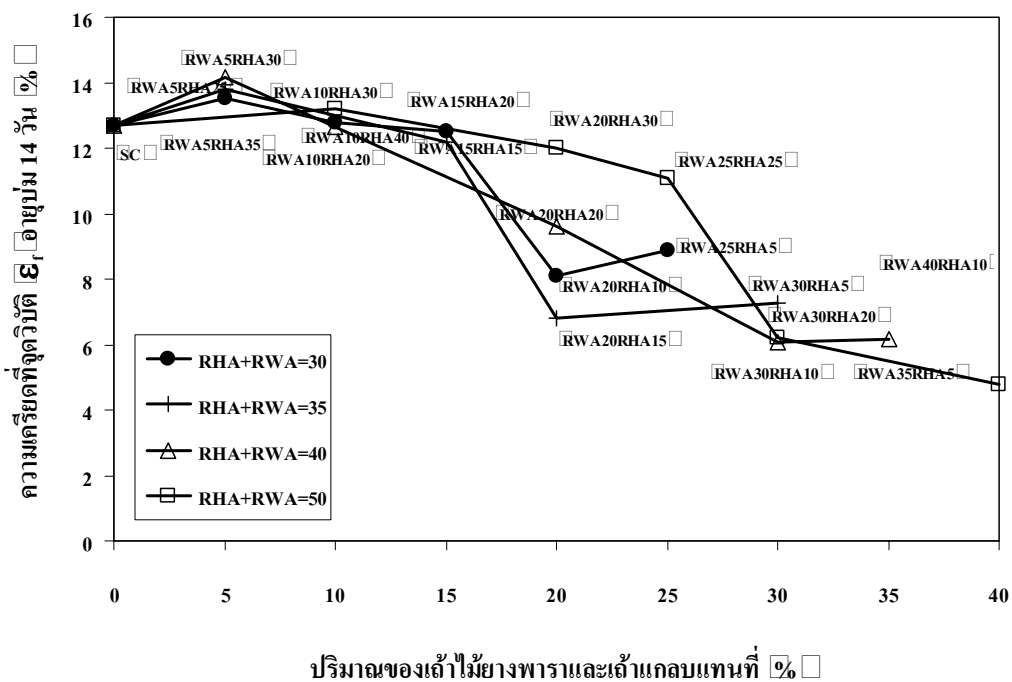


ข □

รูปที่ 4.37 ผลกระทบของดินที่เติมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อความเครียดที่จุดวิบัติที่อายุบ่ม 14 วัน ก □ RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข □ RHA+RWA 30-50%

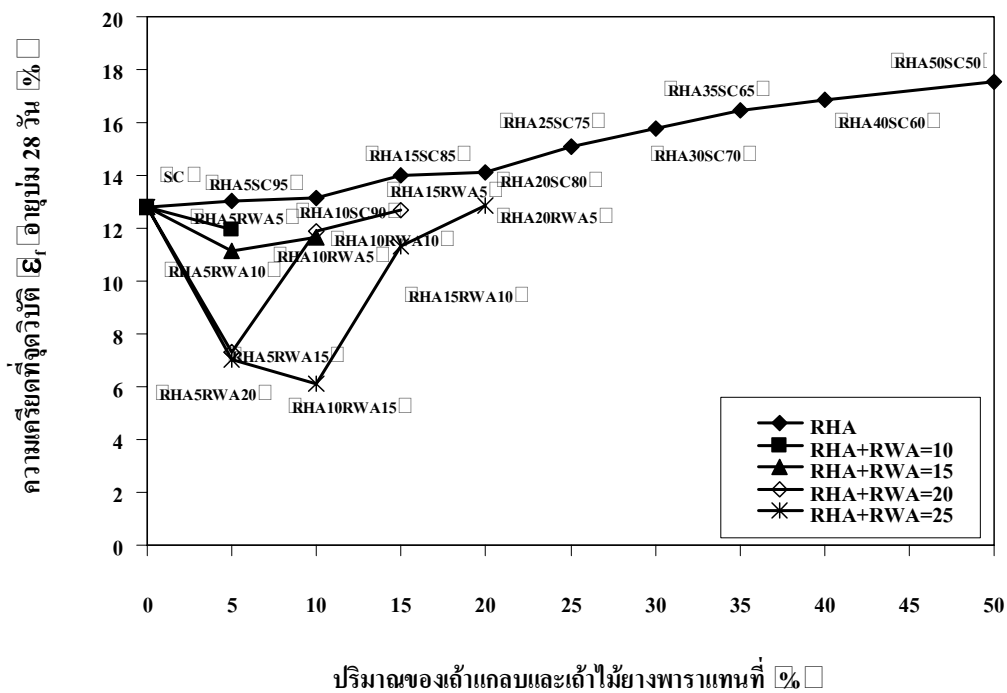


ก

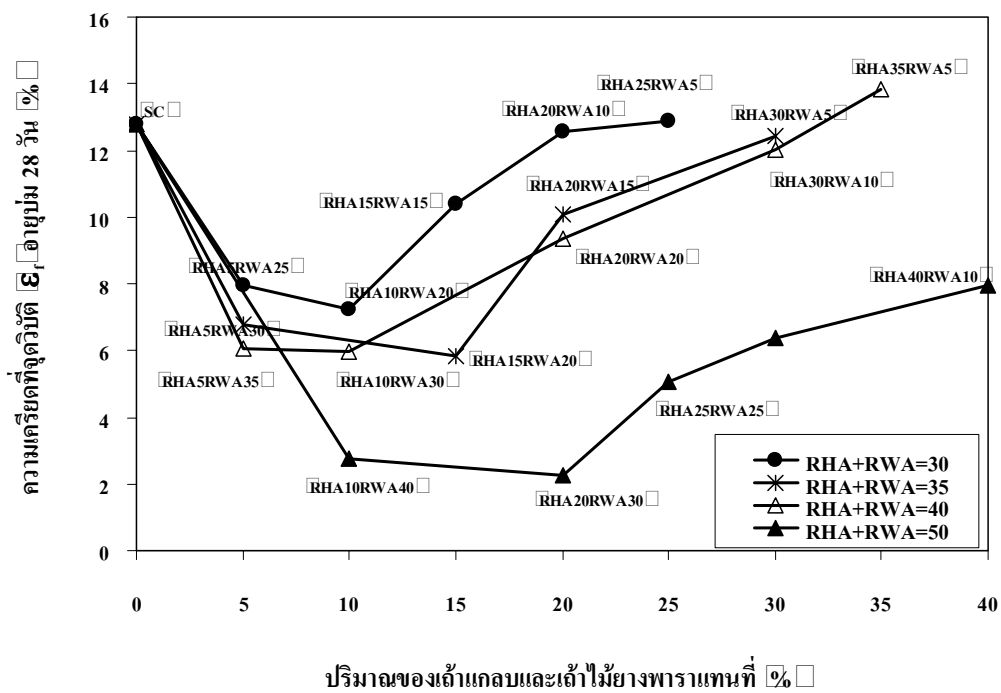


ข

รูปที่ 4.38 ผลกระทบของดินที่เติมเล้าไม้ยางพาราและเล้ากลบต่อความเครียดที่จุดวิตติที่อายุบ่ม 14 วัน ก RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข RWA+RHA 30-50%

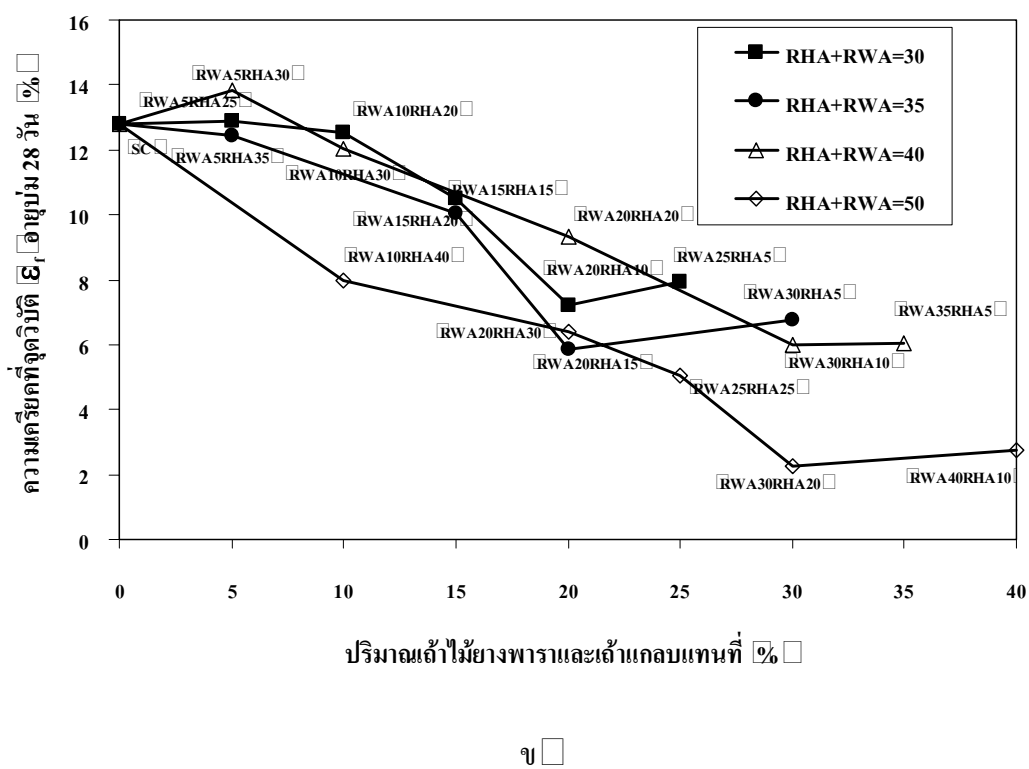
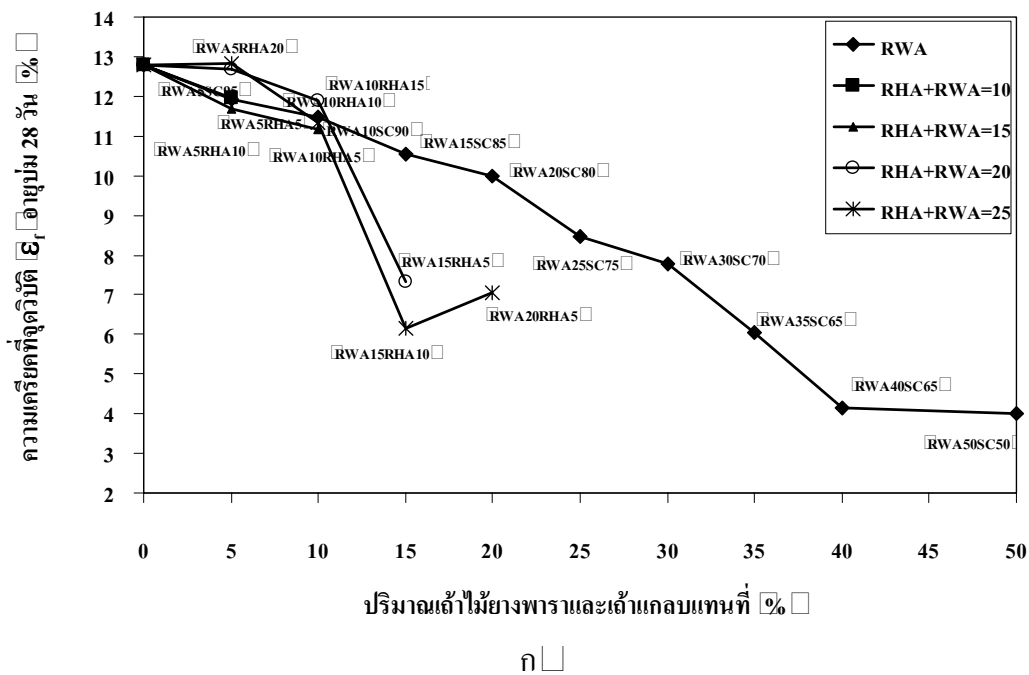


ก

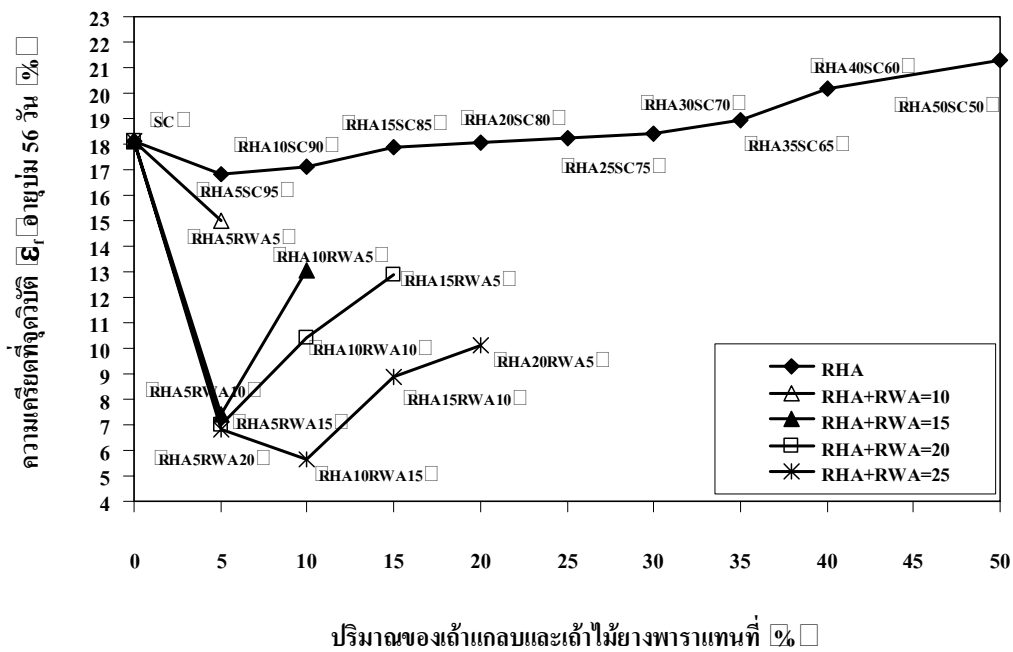


ข

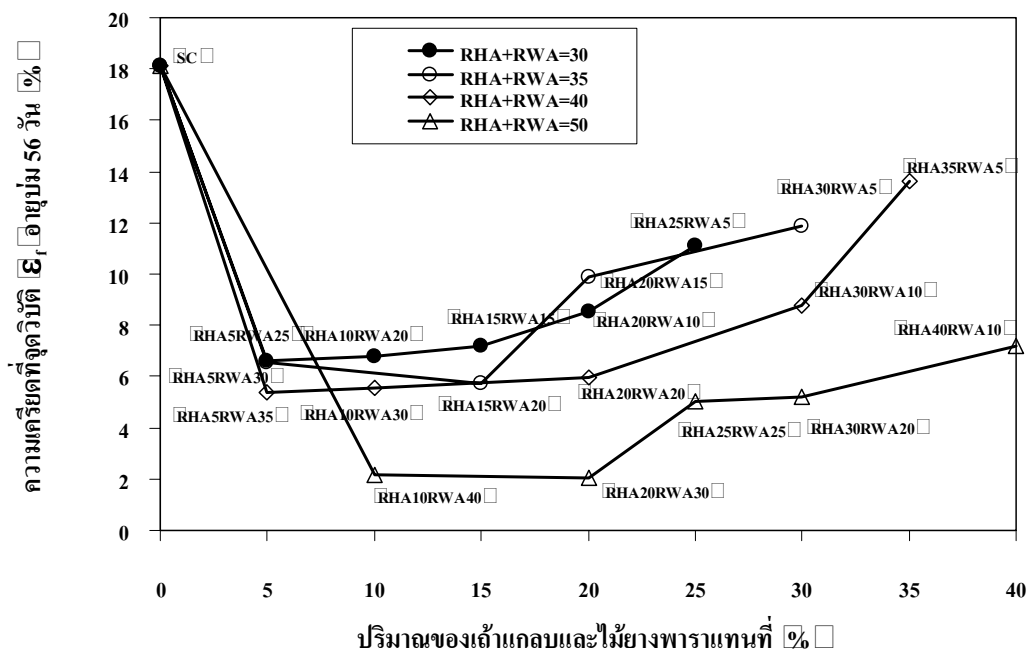
รูปที่ 4.39 ผลกระทบของดินที่เติมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราต่อความเครียดที่จุดวิกฤติที่อายุบ่ม 28 วัน ก RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ ข RHA+RWA 30-50%



รูปที่ 4.40 ผลกระทบของดินที่เติมไส้หมักยางพาราและไส้กลบต่อความเครียดที่จุดวิกฤติที่อายุบ่ม 28 วัน ก RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข RWA+RHA 30-50%

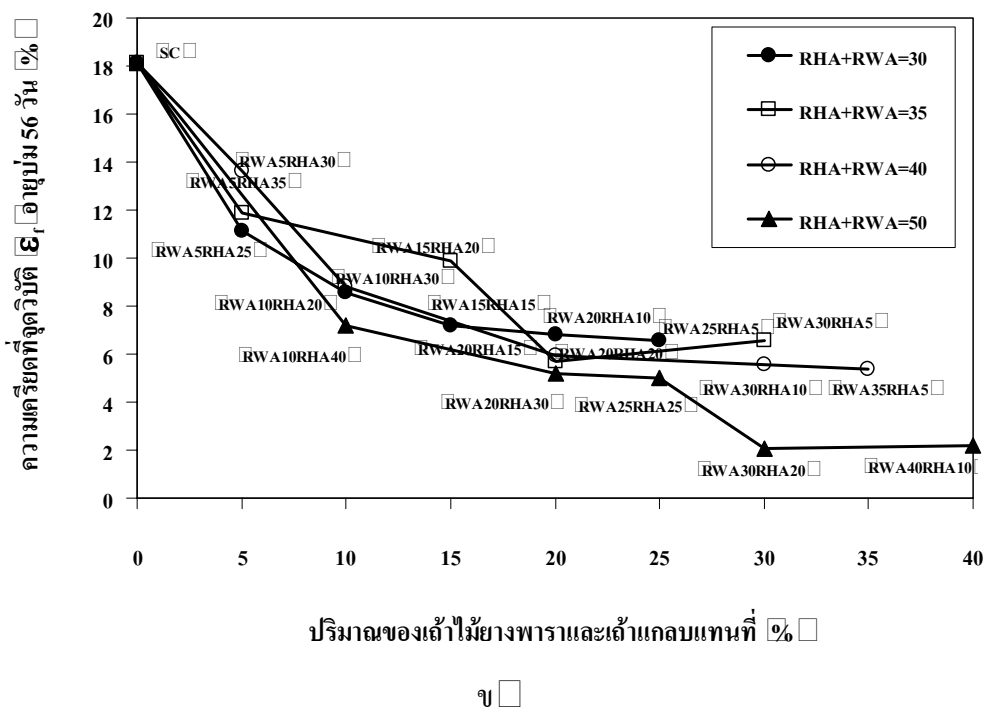
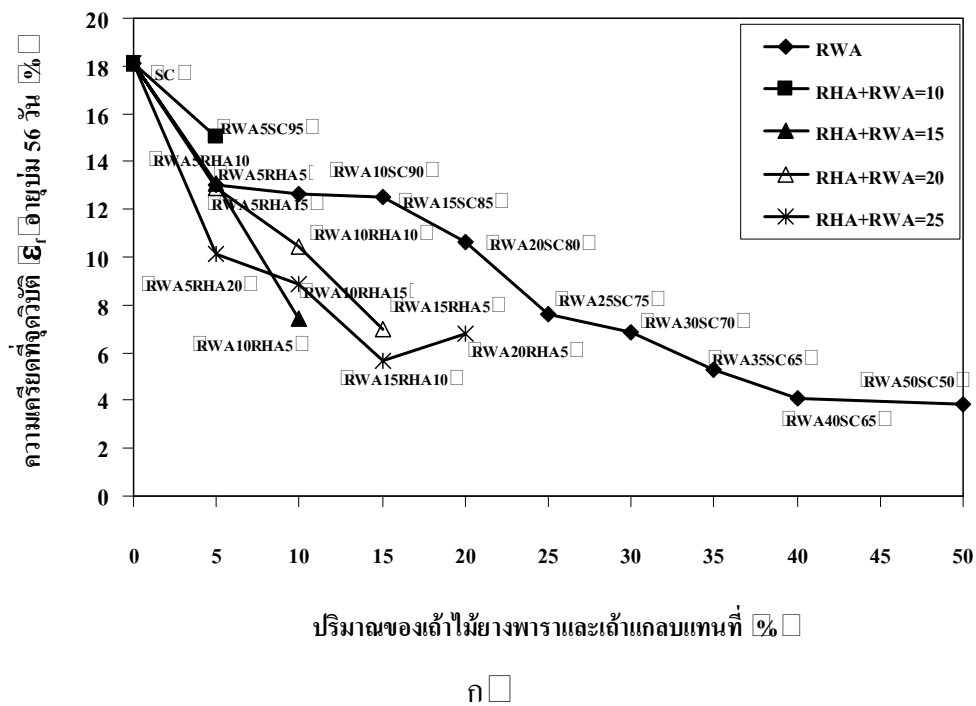


ก



จ

รูปที่ 4.41 ผลกระทบของดินที่เติมเถ้าแกลบและเถ้าไม้อย่างพาราต่อความเครียดที่จุดวิกฤติที่อายุบ่ม 56 วัน ก RHA 5-50% และ RHA+RWA 10-25% และ จ RHA+RWA 30-50%



รูปที่ 4.42 ผลกระทบของดินที่เติมแฉ่ำไม่ยางพาราและแฉ่ำไม้กลบต่อความเครียดที่จุดวิกฤติที่อายุบ่ม 56 วัน ก RWA 5-50% และ RWA+RHA 10-25% และ ข RWA+RHA 30-50%

4.3.4 อัตราส่วนแรงแบกทานของดินเหนียวสงขลาและหลังปรับปรุง

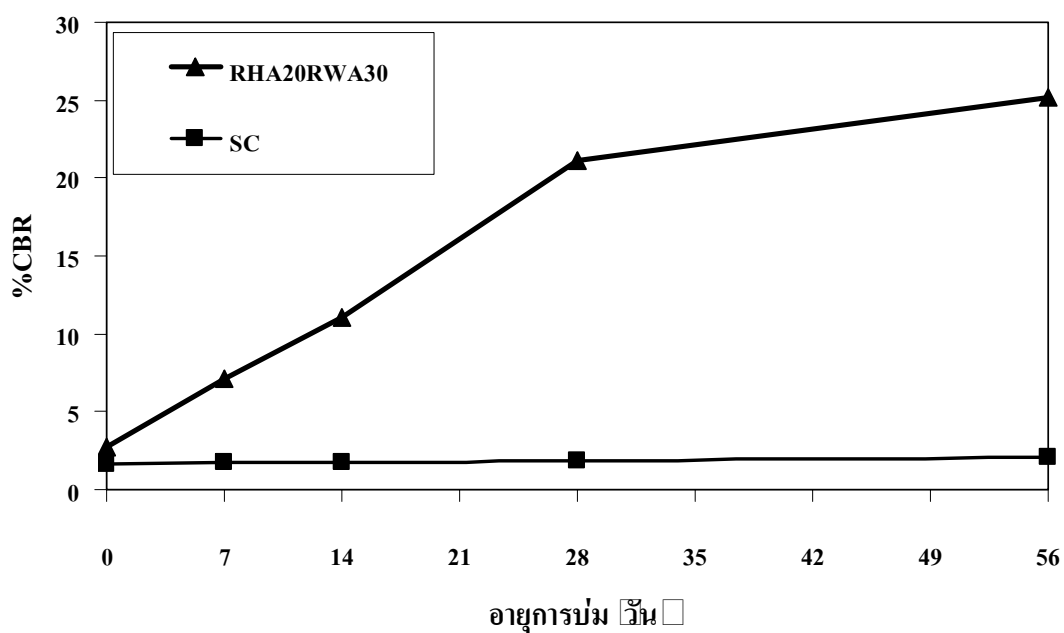
ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ CBR เป็นอัตราส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด คือ RHA20RWA30 จึงนำมาศึกษาทางด้านอัตราส่วนแรงแบกทาน (Bearing Capacity) เพิ่มเติม พบว่าดินเหนียวอ่อน สงขลามีค่า CBR ที่อายุการบ่ม 1 7 14 28 และ 56 วัน เท่ากับ 1.61 1.71 1.80 1.89 และ 2.09 กก./ซม.² ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.43 ซึ่งค่าอัตราส่วนแรงแบกทานมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์การคืนกำลังของดินเหนียวที่ถูกบดจนให้เปลี่ยนสภาพ (thixotropic) ส่วนผลกรรมผสมเถ้าแกลบ 20% และเถ้าไม้ยางพารา 30% ให้ค่าอัตราส่วนแรงแบกทานสูงขึ้นและมีอัตราการพัฒนากำลังอัดอย่างชัดเจน โดยมีค่า CBR ที่อายุบ่ม 1 7 14 28 และ 56 วัน เท่ากับ 2.75 7.12 11.02 21.08 และ 25.16 กก./ซม.² ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.43 ซึ่งค่าอัตราส่วนแรงแบกทานเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่อายุการบ่ม 1 7 14 และ 28 วัน โดยที่อายุการบ่มที่ 56 วัน มีแนวโน้มคงที่ จากผลการทดสอบดังกล่าวนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับ ปรากฏว่าดินเหนียวสงขลาหลังปรับปรุงมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 45 ถึง 1331% ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษา ของดิษฐพร (2551) ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR กับอายุการบ่ม ในการศึกษาการ ปรับปรุงสมบัติของดินเหนียวปากพนังด้วยเถ้าไยปาล์มน้ำและเถ้าไม้ยางพารา พบว่าผลการทดสอบ หาค่า CBR ดินเหนียวปากพนังกรณีหลังปรับปรุงสมบัติมีค่าเพิ่มมากขึ้นหรือมีการพัฒนาอัตราส่วน แรงแบกทานเพิ่มมากขึ้นตามอายุการบ่มที่มากขึ้นตั้งแต่ 79 – 1256%

Kolias et al. (2005) ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR กับอายุการบ่ม ของดินเหนียวปรับปรุงด้วยเถ้าลอยมีแคลเซียมสูงและปูนซีเมนต์พบว่าค่า CBR มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณ เถ้าลอยมีแคลเซียมสูงและปูนซีเมนต์และกำลังมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่สูงขึ้นเช่นเดียวกับ Basha et al. (2005) จากการศึกษาพบว่าเมื่อเติมปูนซีเมนต์ลงในส่วนผสมทำให้ค่า CBR สูงกว่าการ เติมเถ้าแกลบและดินเดิม ถ้าลดลงตามปริมาณเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้นแต่หากเติมปูนซีเมนต์ 8% กับเถ้า แกลบพบว่าค่า CBR มีค่าสูงสุดที่เติมเถ้าแกลบ 20% ได้ค่าสูงที่สุดและยังพบว่าอัตราส่วนกำลังแบก ทานมีการพัฒนาตามอายุบ่มที่เพิ่มขึ้นด้วย

Lin et al. (2007) ได้ผลการทดสอบค่า CBR จากการศึกษาการปรับปรุงดินเหนียวอ่อนด้วย เถ้าจากเต้าน้ำมันและปูนขาว พบว่าการเติมปริมาณของเถ้าเต้าน้ำมันและปูนขาวในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น และบ่มในเวลาต่างกัน พบว่าค่า CBR มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าจากเต้าน้ำมันและปูนขาวที่ เพิ่มขึ้นและอายุการบ่มที่เพิ่มมากขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบอัตราส่วนแรงเบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย (CBR Test) ของดินเหนียวสงขลา และหลังปรับปรุงที่อัตราส่วน RHA20RWA30

สัญลักษณ์	อายุการบ่ม วัน	หน่วยน้ำหนัก รวม กก./ม. ³	ปริมาณความชื้น %	ค่า CBR %
SC	0	1878	30.21	1.61
	7	1862	31.28	1.71
	14	1868	29.88	1.80
	28	1868	30.72	1.89
	56	1864	29.97	2.09
RHA20RWA30	0	1262	42.01	2.75
	7	1257	41.64	7.12
	14	1241	40.81	11.02
	28	1231	40.06	21.08
	56	1227	39.25	25.16



รูปที่ 4.43 พฤติกรรมของค่าอัตราส่วนแรงเบกทานแบบแคลิฟอร์เนียของดินเหนียวสงขลาและกรณีหลังปรับปรุงด้วยอัตราส่วนผสม RHA20RWA30 กับอายุการบ่ม

การก่อสร้างถนนในบริเวณอำเภอเมืองสงขลา โดยเฉพาะในเขตเทศบาลนครสงขลา จะต้องทำการลอกดินเดิมออกแล้วนำวัสดุจากแหล่งอื่นมาใช้แทน เนื่องจากดินเดิมมีค่า CBR ต่ำมาก และค่าดัชนีพลาสติกสูง จึงทำให้การบดอัดยาก เมื่อมีการปรับปรุงสมบัติด้วยเถ้าแกลบ 20% และเถ้าไม้ยางพารา 30% ส่งผลให้ค่า CBR สูงขึ้นและค่าดัชนีพลาสติกต่ำลง ทำให้การบดอัดโครงสร้างถนนดีขึ้น จากการพิจารณาค่า CBR กรณีดินเหนียวสงขลาหลังจากปรับปรุงสมบัติด้วยเถ้าแกลบ 20% และเถ้าไม้ยางพารา 30% พบว่ามีความสามารถที่ใช้ในงานทางเป็น วัสดุชั้นดินเคิมได้ (Subgrade) จึงมีความเป็นไปได้ที่จะปรับปรุงสมบัติของดินเคิมในระดับต้นโดยไม่ต้องนำวัสดุจากแหล่งอื่นมาใช้ งาน ซึ่งมีประโยชน์หลายประการเนื่องจากวัสดุที่นำมาปรับปรุงเป็นวัสดุในท้องถิ่น ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและสามารถนำมาผสมในพื้นที่ก่อสร้างได้สะดวก

4.3.5 การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวสงขลาและกรณีหลังปรับปรุง

ค่าคงตัวของความสามารถอัดตัวได้ (Compressibility Parameter) ของดินเคิม (คงสภาพ) แสดงไว้ในตารางที่ 4.9 ในการทดสอบใช้ค่าความดันระหว่าง 0.206-6.066 กก./ซม.² ผลมีค่าอัตราส่วนโพรง (Void Ratio) ระหว่าง 1.20-1.60 ค่า C_c เท่ากับ 0.271 ค่า C_r เท่ากับ 0.0625 และค่าแรงเค้นสูงสุดที่แยกคัทปในอดีตมีค่าเท่ากับ 0.50 กก./ซม.² ซึ่งค่าคงตัวของค่าอัดตัวคายน้ำสามารถนำมาวิเคราะห์ระยะเวลาและการทรุดตัวได้

ผลจากทดสอบการอัดตัวคายน้ำทั้งสองกรณี คือ กรณีที่หนึ่งใช้ค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 14 วัน ของอัตราส่วนผสมที่ให้กำลังอัดแกนเดียวสูงสุดมาเป็นความดันกระทำต่อดินตัวอย่าง ในการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ซึ่งพบว่าสูตรที่ให้กำลังอัดแกนเดียวสูงสุดคือ เถ้าแกลบ 20% และเถ้าไม้ยางพารา 30% หรือ RHA20RWA30

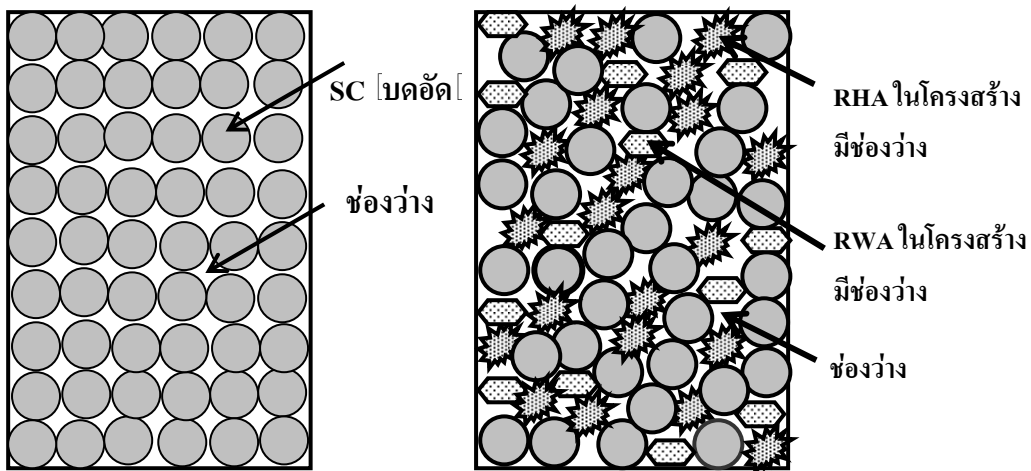
จากผลดังกล่าวในการทดสอบอัดตัวคายน้ำจึงใช้ค่า UCS ของดินปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบ 20% และเถ้าไม้ยางพารา 30% มาเป็นความดันที่กระทำต่อดินตัวอย่าง ซึ่งดินตัวอย่างที่นำมาใช้มีสองชนิดคือ ดินเคิม (บดอัด) และดินหลังปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบ 20% และเถ้าไม้ยางพารา 30% ในการเตรียมตัวอย่างตัวอย่างทั้งสองใช้การบดอัดแบบมาตรฐานและใช้ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหมาะสมของแต่ละชนิดของตัวอย่าง

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำสามารถทราบค่าคงตัวของความสามารถอัดตัวได้ ซึ่งนำมาวิเคราะห์ระยะเวลาเกิดการทรุดตัวและการทรุดตัวได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.9 ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้ใช้ค่าความดันระหว่าง 4.166-138.333 กก./ซม.² (น้ำหนักที่มากกระทำประมาณ 38 ตันต่อตารางเมตร) ผลดินเหนียวอ่อนสงขลา (บดอัด) มีค่าอัตราส่วนโพรงอยู่ระหว่าง

0.700-0.950 กรณีดินตัวอย่างเป็นดินปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบ 20% และเถ้าไม้ยางพารา 30% มีค่าอัตราส่วนโพรงระหว่าง 0.720-0.980 เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนโพรงระหว่างดินเดิม (บดอัดทับดินที่ปรับปรุงด้วยสูตร RHA20RWA30 ซึ่งปรากฏว่าอัตราส่วนโพรงของดินหลังปรับปรุงที่อายุบ่ม 14 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากดินตัวอย่างดังกล่าวถูกเถ้าทั้งสองชนิดแทนที่ดินรวมกันเท่ากับ 50% ซึ่งตัวโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา พบว่ามีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วทั้งเม็ดประกอบกับเป็นเหลี่ยมเป็นมุมดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4

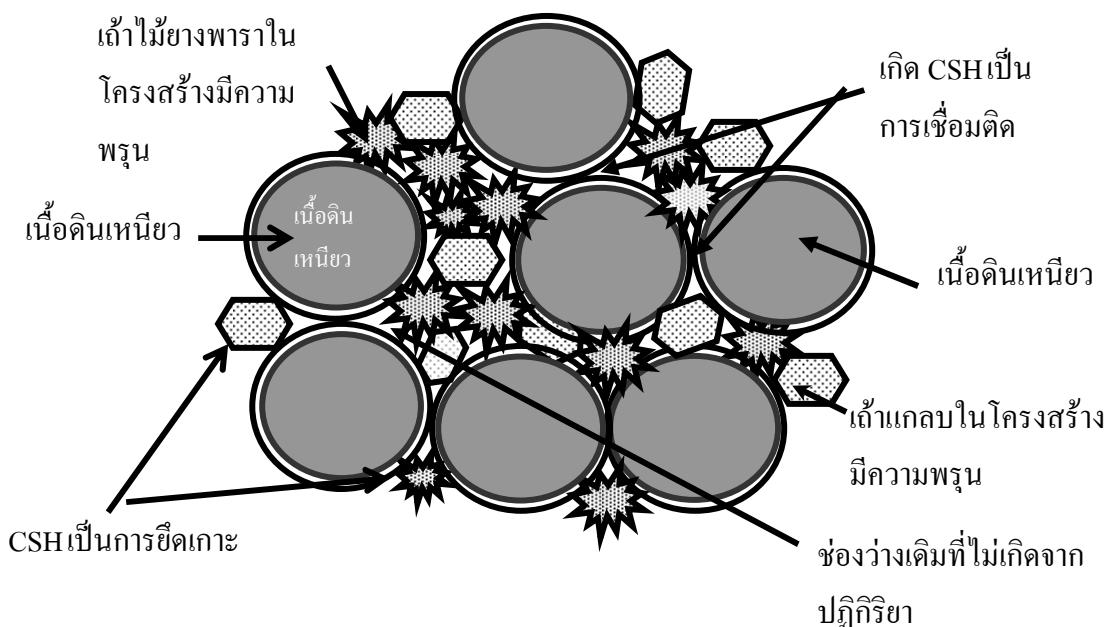
ซึ่งเมื่อขยายลักษณะ โครงสร้างของดินหลังปรับปรุงได้ดังรูปที่ 4.44 ผลจากโครงสร้างของดินดังกล่าวพิจารณาค่าอัตราส่วนโพรงของรูปที่ 4.44 ก อัตราส่วนโพรงเกิดจากช่องว่างระหว่างเม็ดเพียงเดียวแต่หลังจากปรับปรุงด้วยเถ้าทั้งสองชนิดในอัตราส่วนรวมกันที่ 50% จึงส่งผลให้ค่าอัตราส่วนโพรงของกรณีดังกล่าวมีค่าเพิ่มมากขึ้นเพราะเถ้าทั้งสองชนิดที่ใช้ในการผสมหรือแทนที่ในดินตัวอย่างมีความพรุนหรือมีช่องว่างในตัวเองอยู่ด้วยดังรูปที่ 4.44 ข จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจึงสอดคล้องกับผลการทดสอบการอัดคายน้ำซึ่งดินตัวอย่างหลังปรับปรุงที่อายุบ่ม 14 วันมีค่าอัตราส่วนโพรงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องเถ้าทั้งสองชนิดมีความพรุนหรือมีช่องว่างในโครงสร้างของตัวเถ้าเองด้วย จึงส่งผลให้ค่าอัตราส่วนโพรงของดินตัวอย่างดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 11% เมื่อเปรียบเทียบกับดินเดิม (บดอัด แต่มีค่าลดลงเท่ากับ 35% เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนโพรงของดินเดิม ซึ่งมีค่าอัตราส่วนโพรงระหว่าง 1.200-1.600

จากผลการวิเคราะห์รูปที่ 4.45 พิจารณากรณีที่ดินตัวอย่างเป็นดินเหนียวอ่อนสงขลาเดิม (บดอัด ซึ่งโครงสร้างยังเป็นดินเหนียวอ่อนสงขลา 100% เพียงแต่นำมาบดอัดหลังจากทำการทดสอบแม้ว่าใช้ความดันในการทดสอบสูงมากก็ยังสามารถกราฟที่ยังเป็นการอัดตัวคายน้ำ แต่เมื่อมาพิจารณาเส้นกราฟของดินตัวอย่างเป็นดินปรับปรุงด้วยสูตร RHA20RWA30 พบว่าลักษณะเส้นกราฟเป็นลักษณะที่ค่อนข้างเป็นเส้นตรง เนื่องจากว่าโครงสร้างดินตัวอย่างได้เปลี่ยนสภาพไปจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราดังในรูปที่ 4.44 และรูปที่ 4.45 ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมประสานระหว่างเม็ดดินและเม็ดเถ้าทั้งสองชนิดจับตัวกันเป็นก้อนมีทั้งความเหนียวเนื่องจากผสมด้วยเถ้าแกลบและความแข็งเนื่องจากมีส่วนผสมของเถ้าไม้ยางพาราในการจับตัวกันเป็นก้อนดังกล่าว แต่ในตัวโครงสร้างของเถ้าทั้งสองชนิดก็มีความพรุนอยู่ ซึ่งในการทดสอบดังได้ใช้แรงดันที่มากระทำต่อดินตัวอย่างสูงดินตัวอย่างจึงเกิดการทรุดตัวในช่วงแรกของการให้แรงดันทุกๆ ช่วงของการให้แรงมากระทำต่อดินตัวอย่างดังกล่าวจึงหยุดการทรุดลักษณะเส้นกราฟที่ได้จากผลการทดสอบจึงเป็นเส้นตรง เนื่องจากโครงสร้างของดินตัวอย่างหลังปรับปรุงเปลี่ยนไปเป็นลักษณะกึ่งพลาสติกทำให้การอัดคายน้ำลดลง ซึ่งช่วยให้ลดอัตราการทรุดตัว



หมายเหตุ ● เม็ดดิน (SC) □ เถ้าแกลบ (RHA) ★ เถ้าไม้ยางพารา (RWA)

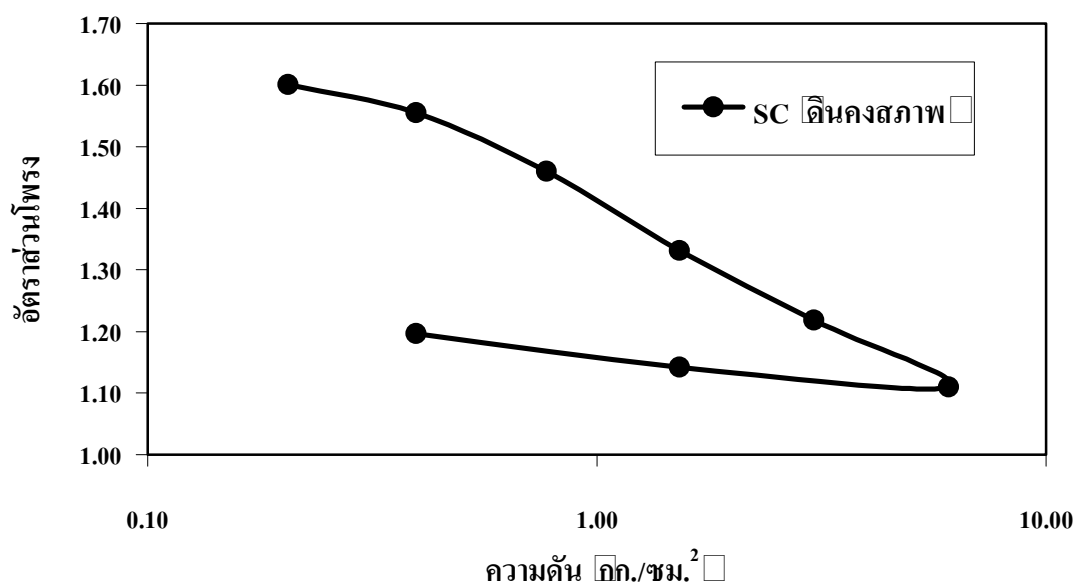
รูปที่ 4.18 ภาพวาดร่างโครงสร้างดินเหนียวสงขลา ก ปริมาณช่องว่างดินเดิม (บดอัด และ ข ปริมาณช่องว่างดินหลังปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบ 20% และเถ้าไม้ยางพารา 30%



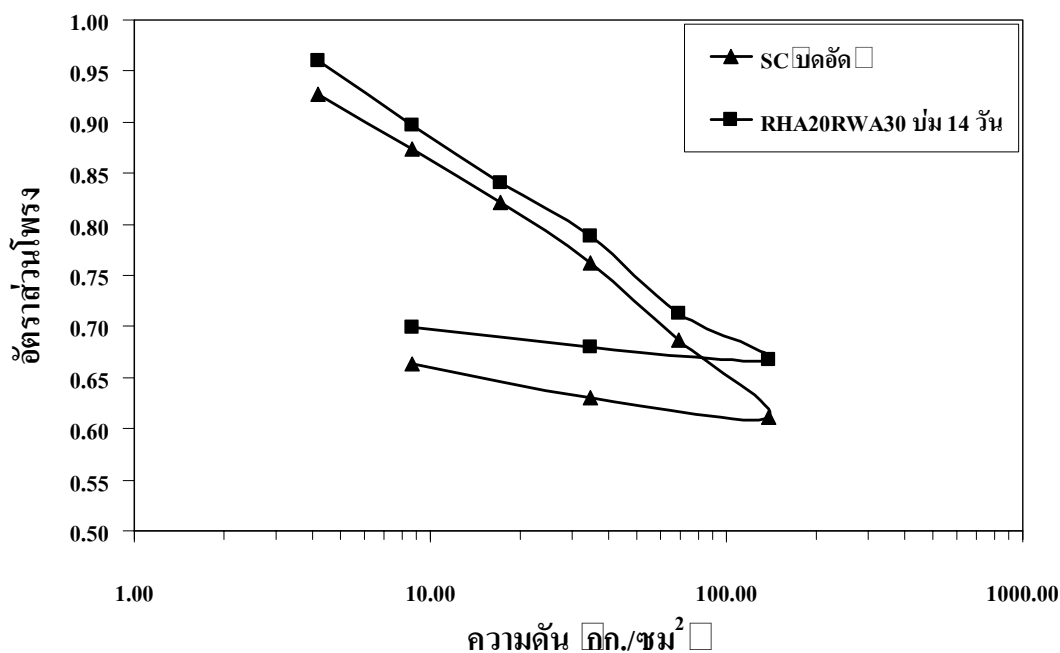
รูปที่ 4.45 ภาพวาดแนวความคิดของการเกิดสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) จากปฏิกิริยาปอซโซลานและไฮดรอกไซด์ในโครงสร้างดินเหนียวอ่อนสงขลาหลังปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมจากการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวสงขลา (คงสภาพ □
ดินเหนียวสงขลา (บดอัด □ และกรณีหลังปรับปรุงด้วย RHA20RWA30

ดินเหนียวอ่อนสงขลา SC □ ก่อนและหลังปรับปรุง			
	SC	SC บดอัด □	RHA20RWA30 อายุ บ่ม 14 วัน
Pressure (ksc. □)	0.206 - 6.066	4.166 – 138.333	4.166 – 138.333
Void Ratio	1.20 - 1.60	0.70-0.95	0.72-0.98
K (cm/sec □)	143.42×10^{-6} - 4.729×10^{-6}	124.93×10^{-7} - 1.583×10^{-7}	4.410×10^{-7} - 2.28×10^{-7}
C_v (cm ² /sec □)	1541.437×10^{-4} - 200.151×10^{-4}	16.647×10^{-2} - 1.583×10^{-2}	78.020×10^{-7} - 4.861×10^{-7}
Compressibility Parameter			
P'_c (ksc. □)	0.50	-	-
C_c	0.271	0.477	0.500
C_r	0.0625	0.056	0.0714



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับความดันกับอัตราส่วนโพรงของดินเหนียวสงขลา (คงสภาพ □



รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับอัตราส่วนโพรงของดินเหนียวอ่อนสงขลา (บดอัด) และกรณีทีหลังปรับปรุงปรับปรุงด้วย RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 14 วัน

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบการยุบตัวของดินเหนียวอ่อนสงขลาในกรณี 2 ค่าความดันที่ใช้ในการทดสอบมีค่าระหว่าง 0.206–6.066 กก./ซม.² ดินเหนียวอ่อนสงขลา (สภาพเดิม) มีค่าอัตราส่วนโพรงระหว่าง 1.200–1.600 และค่าความดันที่ใช้ในการทดสอบจากค่าน้ำหนักของรถบรรทุก (เป็นรถยนต์ที่มีน้ำหนักมากที่สุดที่วิ่งบนถนน) โดยใช้ตัวอย่างที่อายุการบ่ม 7 และ 14 วัน (เพื่อนำข้อมูลมาใช้ประโยชน์ในการทำงานในพื้นที่ก่อสร้างจริงเพราะเวลาเป็นปัจจัยสำคัญในการทำงานในพื้นที่ ดังนั้นจึงใช้อายุบ่มที่สั้นที่สุดเพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานในพื้นที่) มีค่าระหว่าง 1.054–33.212 กก./ซม.² (น้ำหนักที่มากกระทำประมาณ 9 ตัน) ดินเหนียวอ่อนสงขลา (บดอัด) มีค่าอัตราส่วนโพรงระหว่าง 0.600–0.850 กรณีทีหลังจากปรับปรุงด้วยเถ้าแกลบ 20% และเถ้าไม้ยางพารา 30% ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่าอัตราส่วนโพรงระหว่าง 0.900–1.100 และ ที่อายุการบ่ม 14 วัน มีค่าอัตราส่วนโพรงระหว่าง 1.000–1.150 เนื่องจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราพบว่า มีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไปดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 และประกอบกับดินหลังปรับปรุงมีปริมาณการแทนที่ดินเดิมของเถ้าทั้งสองชนิดถึง 50% โดยมีลักษณะโครงสร้างใหม่ดังรูปที่ 4.44 จึงส่งผลให้ค่าอัตราส่วนโพรงจากผลการทดสอบการอัดตัวของดินหลังปรับปรุงมากกว่าดินเหนียวอ่อนสงขลา (บดอัด) แต่ถ้าวัดเปรียบเทียบกับอัตราส่วนโพรงของดินเหนียวอ่อนสงขลา (คงสภาพเดิม)

อัตราส่วนโพรงของดินหลังปรับปรุงทั้งที่อายุบ่ม 7 วันและ 14 วันยังมีค่าอัตราส่วนน้อยกว่าทั้งสองอายุการบ่ม

กรณีดินหลังปรับปรุงที่มีอายุการบ่ม 7 วัน ซึ่งมีค่าอัตราส่วนโพรงมากกว่าดินหลังปรับปรุงที่อายุการบ่ม 14 วัน ในรูปพูนของเส้นทั้งสองชนิดมีปริมาณความชื้นประกอบอยู่ด้วยดังนั้นเมื่อดินหลังปรับปรุงมีอายุการบ่มเพิ่มขึ้นมีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชันของเส้นใยและเส้นใยพาราเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.45 ซึ่งสังเกตได้จากการที่ดินหลังปรับปรุงมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นและยืนยันด้วยผลการวิเคราะห์ XRD เกิดสารประกอบ CSH เพิ่มขึ้นตามอายุบ่มที่มากขึ้น ในการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวได้นำเอาข้อมูลความชื้นที่มีอยู่ในช่องว่างของเส้นทั้งสองชนิดโดยที่เส้นทั้งสองชนิดรวมกันผสมอยู่ในดินหลังปรับปรุงถึง 50% ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 4.44 มาใช้ในการทำปฏิกิริยาดังนั้นผลการทดสอบการอัดตัวของดินหลังปรับปรุงที่มีอายุบ่ม 14 วัน จึงมีอัตราส่วนโพรงมากกว่าดินปรับปรุงที่อายุการบ่ม 7 วันเล็กน้อย

การปรับปรุงด้วยเส้นใย 20% และเส้นใยพารา 30% ส่งผลให้ค่า Pre-consolidation Pressure สูงขึ้นอย่างชัดเจนเท่ากับ 6.15 และ 8.20 กก./ซม.² ที่อายุการบ่ม 7 และ 14 วันตามลำดับ จากกรณีของดินเหนียวอ่อนสงขลาที่มีค่า Pre-consolidation Pressure เท่ากับ 0.500 กก./ซม.² และ 2.30 กก./ซม.² ของดินสภาพเดิมและบดอัดตามลำดับ การปรับปรุงด้วยเส้นใย 20% และเส้นใยพารา 30% มีค่า Compression Index เท่ากับ 0.3809 และ 0.2761 สูงกว่าของดินเหนียวอ่อนสงขลา (สภาพเดิม C_c มีค่าเท่ากับ 0.271 แต่ต่ำกว่าของดินเหนียวอ่อนสงขลา (บดอัด C_c มีค่าเท่ากับ 0.490 ส่วนค่า Recompression Index มีค่าลดลงอย่างชัดเจนเท่ากับ 0.0445 และ 0.0366 ของที่อายุการบ่ม 7 และ 14 วันตามลำดับ จากเดิมกรณีของดินเหนียวอ่อนสงขลาเท่ากับ 0.0625 และ 0.0958 ของสภาพเดิมและบดอัดตามลำดับ

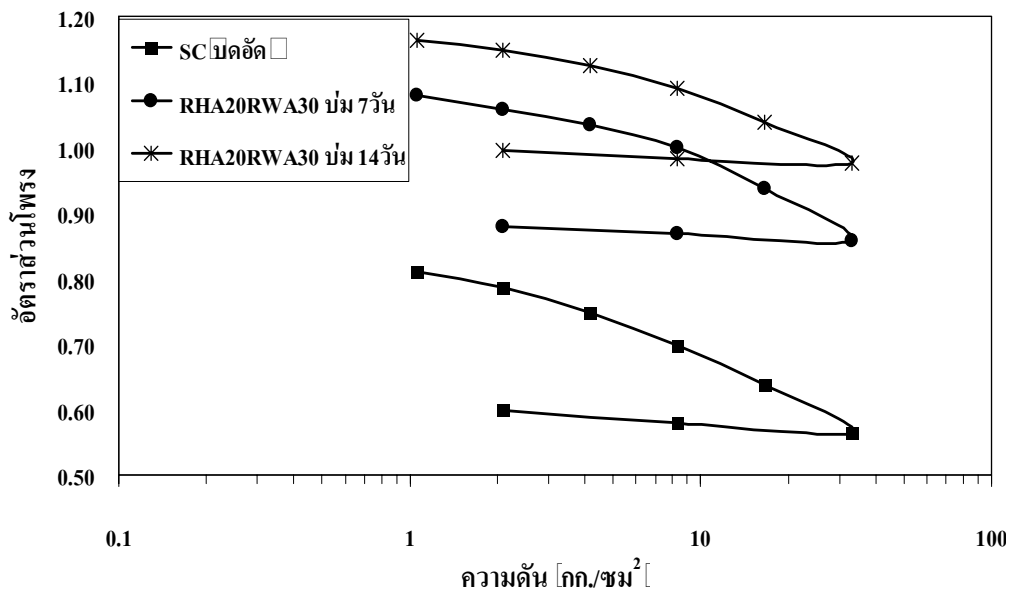
จากปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชันของเส้นใยและเส้นใยพาราทำให้เกิดการเชื่อมประสานระหว่างเม็ดดินส่งผลให้อนุภาคดินจับตัวกันเป็นก้อน โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวของน้ำ (Coefficient of Consolidation C_v) และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ (Coefficient of Permeability C_p) ของดินที่ปรับปรุงด้วยเส้นใย 20% และเส้นใยพารา 30% ทำให้การอัดตัวแบบคายน้ำลดลงดังในรูปที่ 4.45 ซึ่งจะช่วยลดอัตราการทรุดตัวได้ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของสุภกิจและคณะ (2545) ได้กล่าวอธิบายถึงการทดลองการยุบอัดตัวของน้ำ จากการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว พบว่าการผสมปูนซีเมนต์และปูนขาวทำให้สมบัติทางวิศวกรรม เช่น ค่า C_v , k , C_p และ C_c ลดลงแต่ในขณะเดียวกันค่า P'_c เพิ่มขึ้นและยังสอดคล้องกับของเชาวนี (2544) ได้กล่าวอธิบายเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเส้นใยกับอัตราส่วนโพรงคือ เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย พบว่าส่งผลให้ค่าอัตราส่วนโพรงเพิ่มขึ้นจาก 10%

65% และ 73% เมื่อผสมเข้าเกลบตั้งแต่ 4% 8% และ 12% ตามลำดับ โดยมีอายุบ่ม 28 วัน ส่วนค่า C_v , k , C_r และ C_c ลดลงแต่ในขณะเดียวกันค่า P'_c เพิ่มมากขึ้น

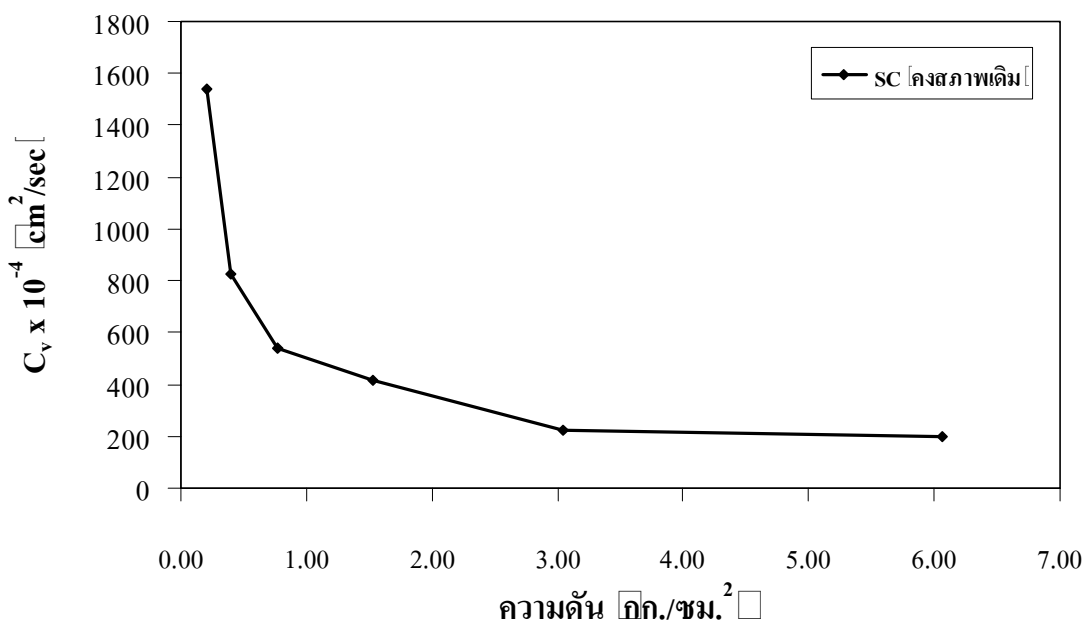
ดิษฐพร (2551) ได้กล่าวถึงผลการทดสอบหาค่าการยุบอัดตัวของดินเหนียวจากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติดินเหนียวปากพั้งด้วยเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา พบว่าหลังจากผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา ส่งผลให้สมบัติทางวิศวกรรมเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าอัตราส่วนโพรงเพิ่มขึ้น 6% ส่วนค่า C_v , k , C_r และ C_c ลดลงแต่ในขณะเดียวกันค่า P'_c เพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมจากการอัดตัวของดินเหนียวสงขลา (คงสภาพดินเหนียวสงขลา (บดอัด และกรณีหลังปรับปรุงด้วยสูตร RHA20RWA30

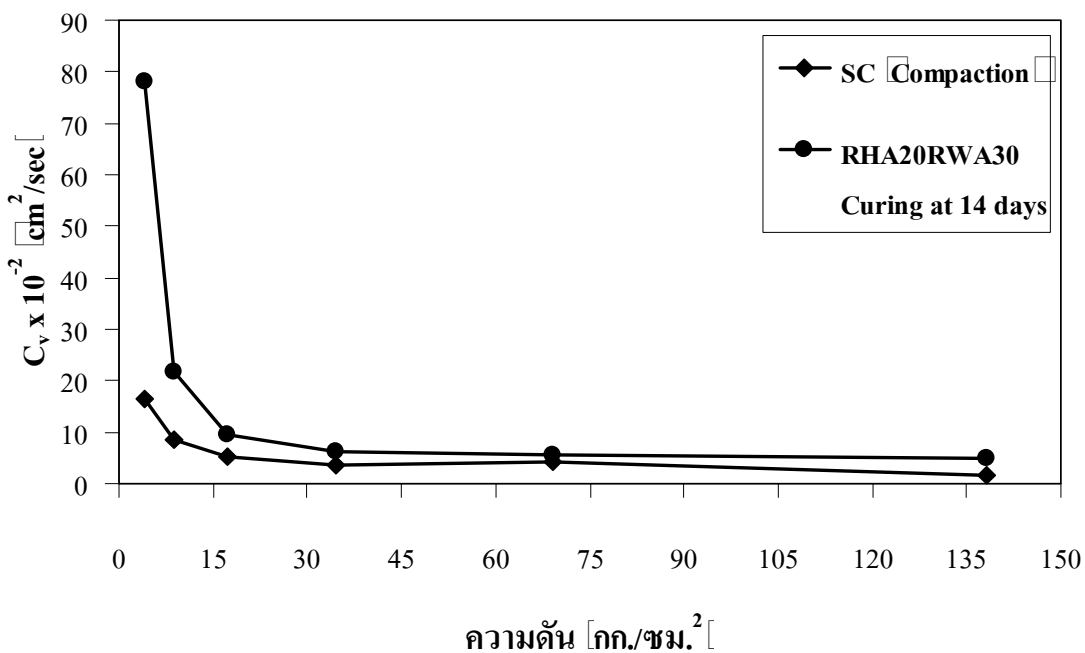
ดินเหนียวอ่อนสงขลา SC ก่อนและหลังปรับปรุง				
	SC	SC บดอัด	RHA20RWA30 อายุบ่ม 7 วัน	RHA20RWA30 อายุบ่ม 14 วัน
Pressure (ksc.)	0.206 - 6.066	1.054 - 33.212	1.054 - 33.212	1.054 - 33.212
Void Ratio	1.20-1.60	0.60-0.85	0.90-1.10	1.00-1.15
K (cm/sec)	143.42×10^{-6} - 4.729×10^{-6}	6.636×10^{-6} - 2.001×10^{-6}	0.836×10^{-6} - 0.280×10^{-6}	0.040×10^{-6} - 0.022×10^{-6}
C_v (cm ² /sec)	1541.437×10^{-4} - 200.151×10^{-4}	339.389×10^{-4} - 11.671×10^{-4}	159.441×10^{-4} - 56.543×10^{-4}	200.226×10^{-4} - 72.721×10^{-4}
Compressibility Parameter				
P'_c (ksc.)	0.50	2.30	6.15	8.20
C_c	0.271	0.490	0.3809	0.2761
C_r	0.0625	0.0958	0.0445	0.0366



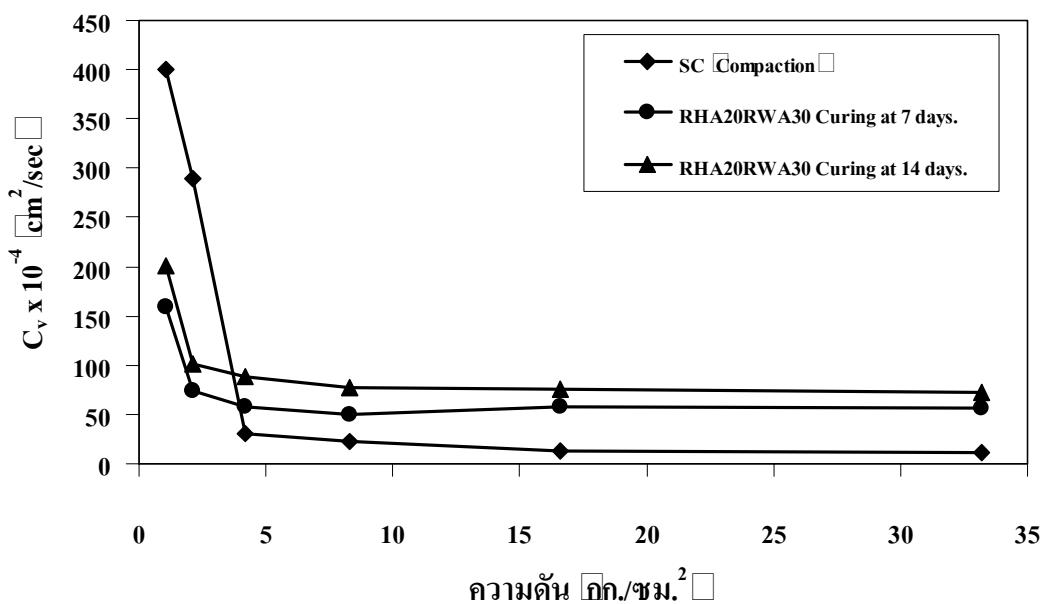
รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับอัตราส่วน โพรงของดินเหนียวอ่อนสงขลา (บดอัด และกรณีหลังปรับปรุงด้วย RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 7 และ 14 วัน



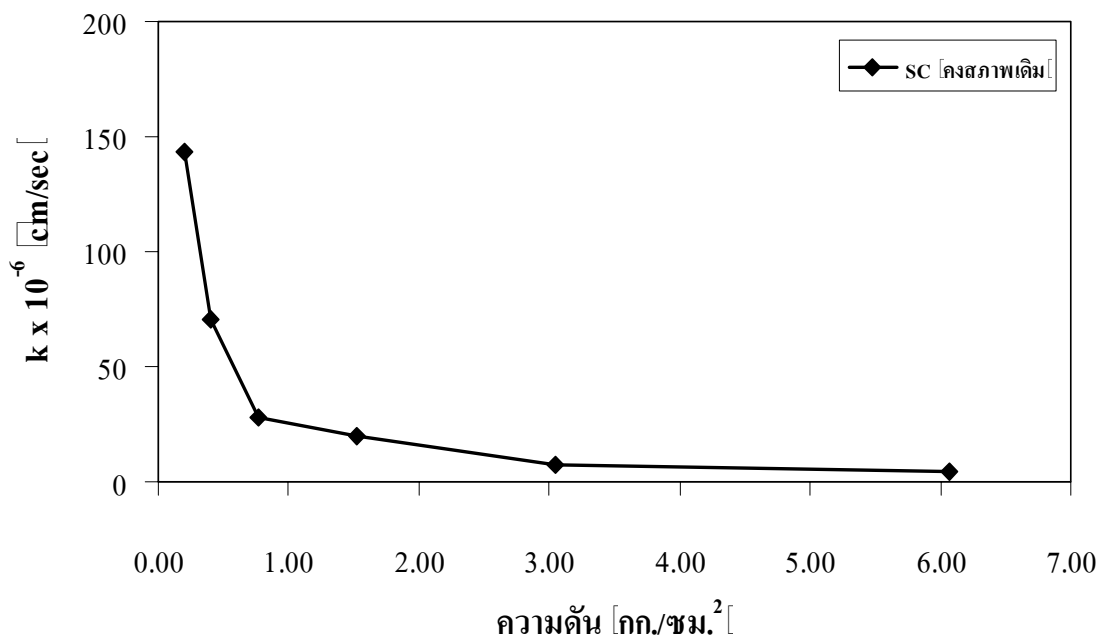
รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อน สงขลา



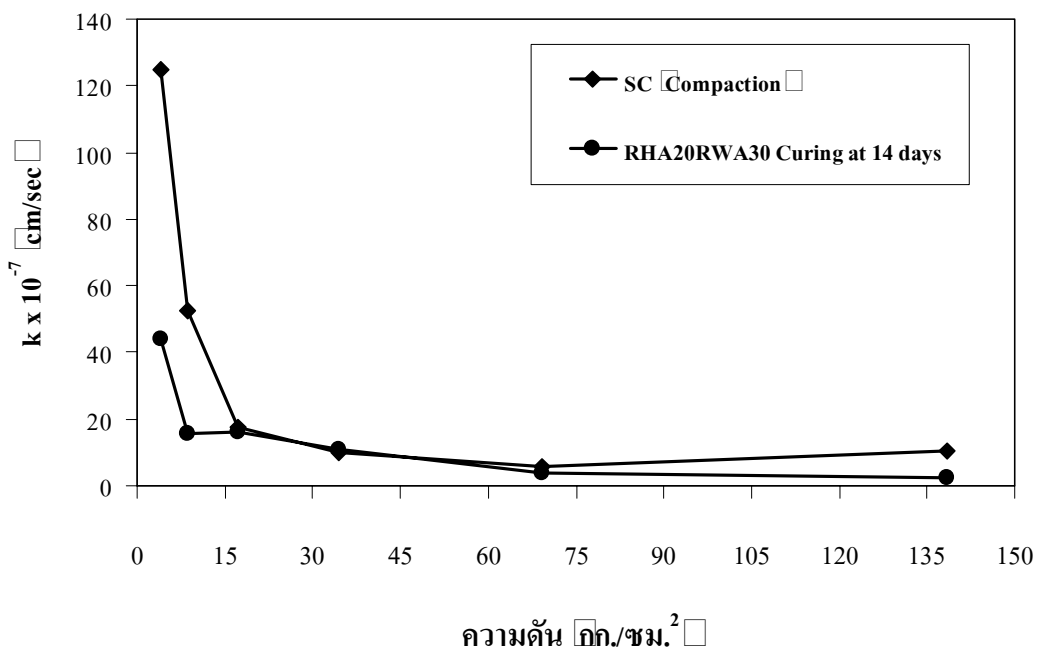
รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนสงขลา (บดอัดและกรณีปรับปรุงด้วย RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 14 วัน)



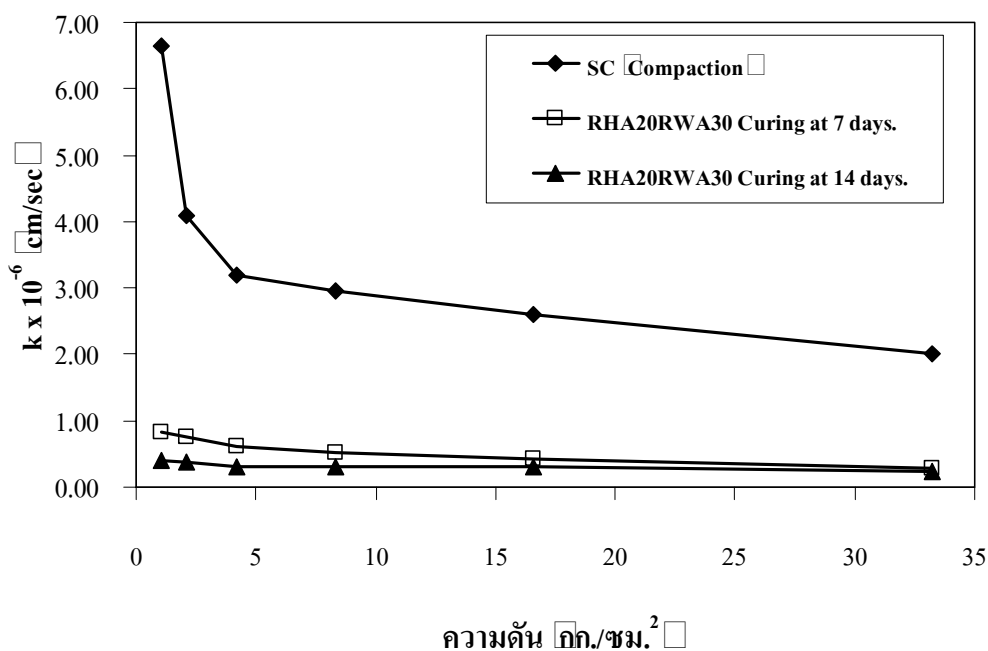
รูปที่ 4.51 พฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนสงขลาของดินเหนียวอ่อนสงขลา (บดอัดและกรณีหลังปรับปรุงด้วย RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 7 และ 14 วัน)



รูปที่ 4.52 พฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ของดินเหนียวอ่อนสงขลาคงสภาพ



รูปที่ 4.53 พฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ของดินเหนียวอ่อนสงขลา (บดอัดและกรณีปรับปรุงด้วย RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 14 วัน

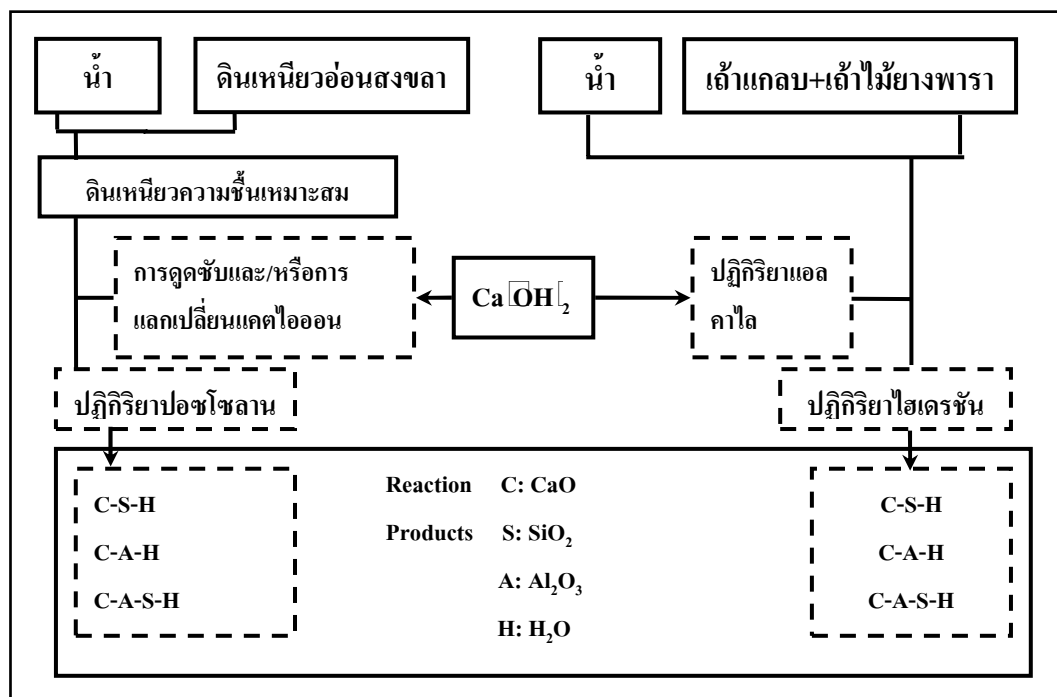


รูปที่ 4.54 พฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ของของดินเหนียวอ่อนสงขลา (บดอัด และกรณีหลังปรับปรุงด้วย RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 7 และ 14 วัน

4.3.6 องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลาหลังปรับปรุง

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) โดยวิเคราะห์เฉพาะที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราที่มีอายุบ่ม 28 วัน ยกเว้นสูตรปรับปรุงคุณภาพด้วย RHA50SC50 RWA50SC50 และ RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของค่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชันของวัสดุปอซโซลานซึ่งมีลักษณะการเกิดปฏิกิริยาโดยที่เถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราทำหน้าที่เหมือนกับปูนซีเมนต์ดังในรูปที่ 4.55 โดยจากการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ พบการเกิด CSH แต่ไม่พบ CAH ในทุกอัตราส่วนการผสมและพบแร่ควอตซ์ มีสโคไวต์ เคโอลินต์และอิลไลต์เป็นหลัก ซึ่งเป็นองค์ประกอบแร่ที่มักพบในดิน โดยจากการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 4.56 ถึง 4.58 เนื่องจากดินสงขลาเกิดจากตะกอนของทะเลในอดีต (รูปที่ 2.1) และมีปริมาณคลอไรด์ สสารอินทรีย์และ ซัลเฟตปนอยู่

ในปริมาณที่สูง โดยส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราช้ากว่าปรกติ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาอาจไม่สมบูรณ์และส่งผลให้กำลังอัดพัฒนาไม่เต็มที่



รูปที่ 4.55 แนวความคิดของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราในดินเหนียวสงขลา

จากผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว พบว่า กรรมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสูตร RHA20RWA30 ส่งผลให้มีค่ากำลังอัดสูงสุดและมีอัตราการพัฒนากำลังอัดอย่างชัดเจน จากการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบแร่พบการเกิดแร่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งตรวจพบได้ที่อายุการบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน ซึ่งปรากฏว่าแร่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม คือ 8.79% 10.68% 15.68% และ 16.03% ตามลำดับและพบแร่แคลไซต์เป็นองค์ประกอบหลักในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา ในแต่ละช่วงของการบ่มเกิดจากการทำปฏิกิริยาของ Ca(OH)_2 กับ SiO_2 ซึ่งในเถ้าแกลบมีค่า SiO_2 สูง ประกอบกับเถ้าไม้ยางพาราก็มี CaO สูงด้วยจึงส่งผลให้เกิด CSH ในทุกอายุการบ่ม

ส่วนผลวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบแร่ที่อายุการบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน ก็พบสารประกอบ CSH เช่นกันแต่ไม่พบสารประกอบ CAH เนื่องจากในดินเหนียวสงขลาและเถ้าแกลบมีปริมาณของ SiO_2 สูงแต่ Al_2O_3 มีน้อย ดังนั้นจึงไม่เอื้อต่อการเกิดขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดเป็นสารประกอบ

CSH ซึ่งสอดคล้องกันกับเกษมและโกศล (2544) ได้ศึกษาผลกระทบของสสารอินทรีย์ โดยได้ทดลองนำดินอ่อนกรุงเทพฯ ที่มีสสารอินทรีย์ปริมาณ 4 ถึง 22% ผสมปูนซีเมนต์ 150 กก./ม.³ พบว่าส่งผลให้ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าลดลงเฉลี่ย 43.9% และ Sherwood (1958) กล่าวว่า การปนเปื้อนของสสารอินทรีย์ได้ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราดังตารางที่ 4.11 และการวิเคราะห์ห่อหุ้มประกอบแร่โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ดังรูปที่ 4.22 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของดิษฐพร (2551) ได้กล่าวถึงลักษณะการเกิดสารประกอบ CSH จากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าไยปาล์มและเถ้าไม้ยางพารา จากผลการสังเกตด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าเกิดสารประกอบ CSH ที่อายุการบ่ม 56 วันเท่านั้น จึงส่งผลให้ดินเหนียวปากพูนังสามารถรับกำลังได้เพิ่มขึ้น

Terrel et al. (1979) และสมมาตร (2550) กล่าวว่าถึงผลกระทบของสสารอินทรีย์ พบว่า สสารจะดูดซับ ประจุไฟฟ้าแคลเซียมจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นผลให้ pH ลดลงและยังไปยับยั้งกระบวนการแข็งตัวของสารประกอบที่เกิดขึ้นจึงส่งผลกระทบต่อการพัฒนากำลังของดินเหนียวอ่อน

ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวสงขลากรณีหลังปรับปรุงที่อายุบ่ม 28 วัน

สัญลักษณ์ของ สูตร	องค์ประกอบแร่ %						
	ควอตซ์	เคลอไลต์	อิลไลต์	แคลไซต์	อาแคนไทต์	จาโรไซต์	CSH
RHA5SC95	21.84	21.63	56.53	-	-	-	-
RHA10SC90	34.48	35.66	29.86	-	-	-	-
RHA15SC85	44.45	21.85	33.70	-	-	-	-
RHA20SC80	34.87	34.64	30.49	-	-	-	-
RHA25SC75	37.86	37.08	25.06	-	-	-	-
RHA30SC70	37.04	36.08	26.88	-	-	-	-
RHA35SC65	34.56	33.68	31.76	-	-	-	-
RHA40SC60	47.63	22.07	30.30	-	-	-	-
RHA50SC50	36.95	28.40	35.65	-	-	-	-
RWA5SC95	44.97	18.91	-	4.71	-	31.41	-
RWA10SC90	59.54	16.68	-	10.20	-	13.58	-
RWA15SC85	47.47	12.30	-	15.59	-	24.64	-
RWA20SC80	56.08	11.61	-	18.45	-	13.86	-
RWA25SC75	50.93	11.74	-	17.53	-	19.80	-
RWA30SC70	33.34	8.45	17.02	20.51	20.68	-	-
RWA35SC65	43.66	6.03	-	20.02	8.06	33.23	-
RWA40SC60	22.96	27.88	-	17.57	5.65	25.94	-
RWA50SC50	23.41	17.41	15.63	25.57	7.75	-	10.23
RHA5RWA5	48.77	12.56	33.35	5.32	-	-	-
RHA5RWA10	44.24	16.40	-	18.25	-	21.11	-
RHA10RWA5	50.69	18.34	-	10.37	-	20.60	-
RHA5RWA15	44.67	12.76	32.36	10.21	-	-	-
RHA10RWA10	42.37	14.68	33.79	9.16	-	-	-
RHA15RWA5	42.77	14.43	35.74	7.06	-	-	-
RHA5RWA20	45.69	12.26	-	18.82	-	23.23	-
RHA10RWA15	52.58	11.32	-	16.76	-	19.34	-
RHA15RWA10	43.54	16.05	-	15.16	-	25.25	-

ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวสงขลากรณีหลังปรับปรุงที่อายุบ่ม 28 วัน (ต่อ □)

สัญลักษณ์ของ สูตร	องค์ประกอบแร่ % □						
	ควอตซ์	เคลโอลินต์	อิลไลต์	แคลไซต์	อาแคนไทต์	จาโรไซต์	CSH
RHA20RWA5	53.87	11.66	-	12.90	-	22.38	-
RHA5RWA25	36.83	12.70	27.05	16.74	-	-	6.68
RHA10RWA20	40.37	9.77	31.71	12.65	-	-	5.50
RHA15RWA15	37.24	23.60	21.87	11.97	-	-	5.32
RHA20RWA10	44.05	10.98	29.15	11.75	-	-	4.07
RHA25RWA5	41.89	13.72	35.40	5.74	-	-	3.25
RHA5RWA30	27.10	3.82	19.54	28.67	20.87	-	-
RHA15RWA20	38.10	24.64	-	21.34	8.67	7.25	-
RHA20RWA15	49.45	13.99	-	19.43	-	17.13	-
RHA30RWA5	54.65	16.53	-	17.67	-	11.51	-
RHA5RWA35	29.55	31.74	-	15.84	15.55	-	7.32
RHA10RWA30	25.45	37.31	20.39	9.85	-	-	7.00
RHA20RWA20	27.75	31.68	22.81	12.80	-	-	4.96
RHA30RWA10	39.82	26.84	20.86	8.52	-	-	3.96
RHA35RWA5	33.55	34.40	24.16	5.62	-	-	2.27
RHA10RWA40	32.31	9.96	-	32.72	13.40	-	11.61
RHA20RWA30	28.38	19.09	17.82	19.06	-	-	15.65
RHA25RWA25	39.84	9.95	-	19.78	20.23	-	10.20
RHA30RWA20	43.73	10.71	-	20.37	16.73	-	8.46
RHA40RWA10	43.16	13.40	-	20.42	15.16	-	7.86

ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลากรณีหลังปรับปรุงด้วยสูตร RHA50SC50 ที่อายุบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน

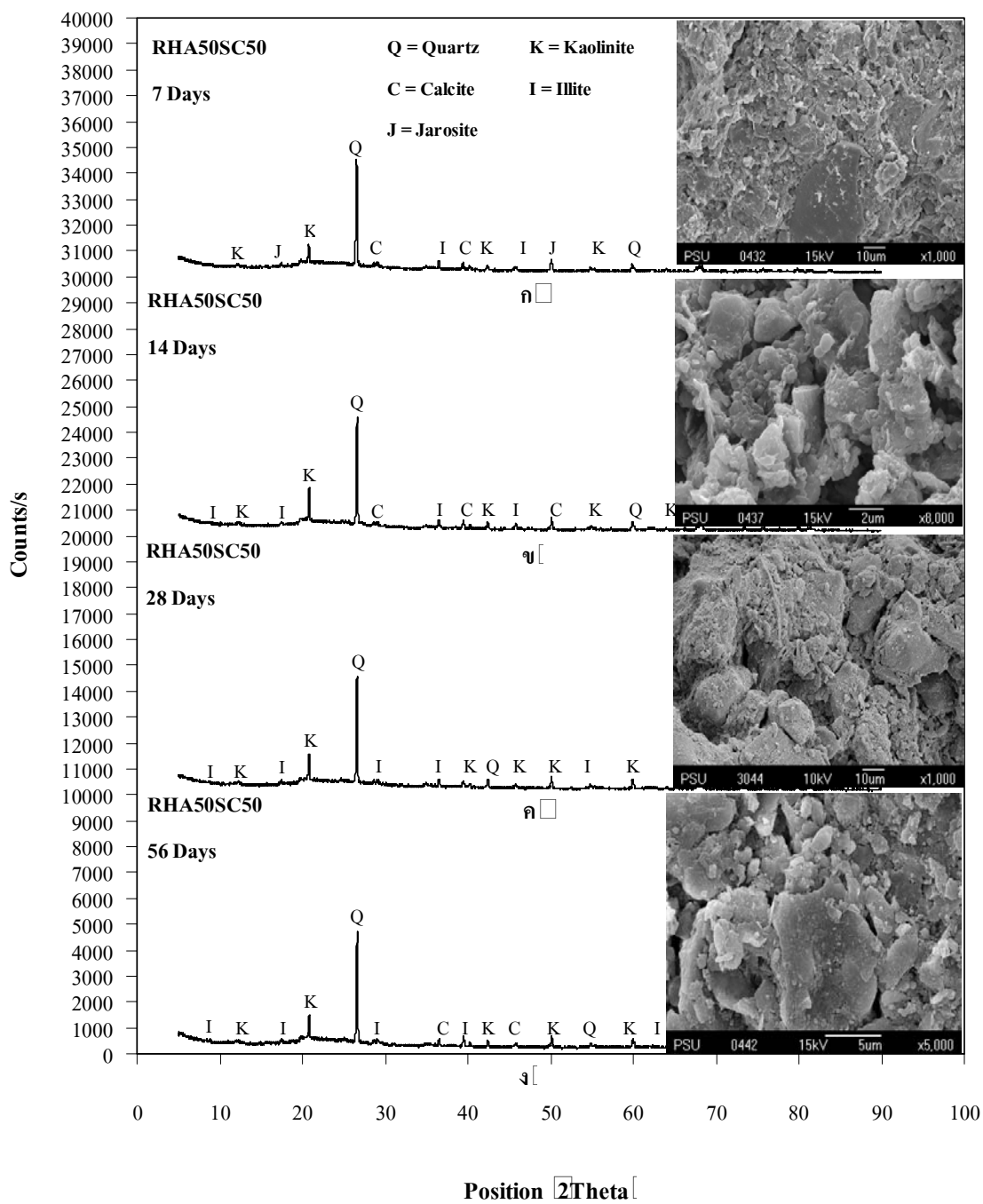
อายุการบ่ม วัน	องค์ประกอบแร่	ปริมาณ %
7	ควอตซ์ (Quartz)	54.85
	แคลไซต์ (Calcite)	8.74
	จาโรไซต์ (Jarosite)	23.01
	เคโอลิไนต์ (Kaolinite)	13.40
14	ควอตซ์ (Quartz)	45.52
	แคลไซต์ (Calcite)	6.89
	เคโอลิไนต์ (Kaolinite)	15.78
	อิลไลต์ (Illite)	31.81
28	ควอตซ์ (Quartz)	36.95
	เคโอลิไนต์ (Kaolinite)	28.40
	อิลไลต์ (Illite)	34.65
56	ควอตซ์ (Quartz)	45.01
	แคลไซต์ (Calcite)	7.99
	เคโอลิไนต์ (Kaolinite)	11.03
	อิลไลต์ (Illite)	35.97

ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลากรณีหลังปรับปรุงด้วยสูตร RWA50SC50 ที่อายุบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน

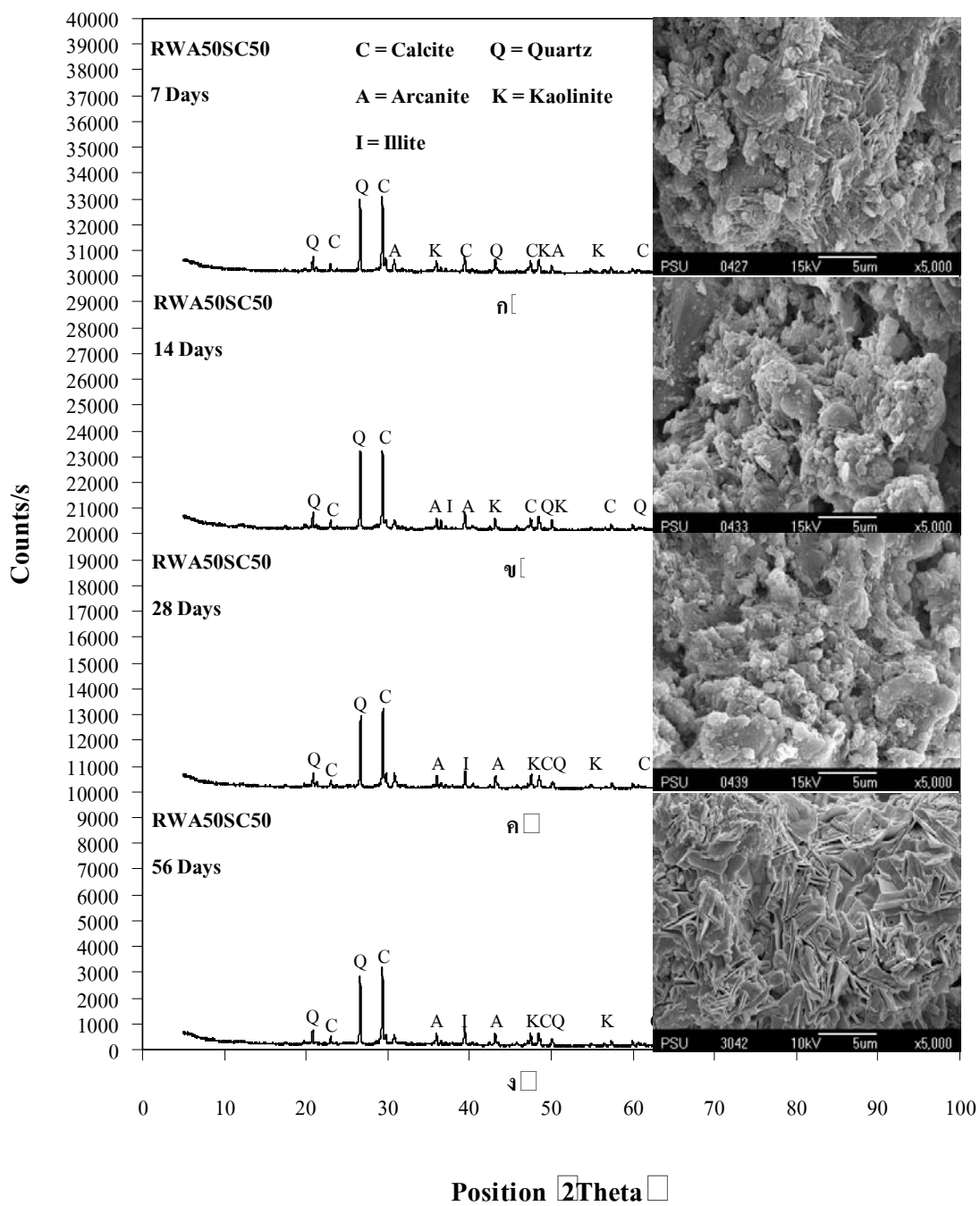
อายุการบ่ม วัน	องค์ประกอบแร่	ปริมาณ %
7	ควอตซ์	28.94
	แคลไซต์	36.31
	เคโอลิไนต์	22.33
	อาแกนไทต์	12.42
14	ควอตซ์	20.13
	แคลไซต์	26.16
	เคโอลิไนต์	24.99
	อาแกนไทต์	16.04
	อิลไลต์	12.68
28	ควอตซ์	23.41
	แคลไซต์	25.57
	แคลเซียมซลิเกตไฮเดรต (CSH)	10.23
	เคโอลิไนต์	17.41
	อิลไลต์	15.63
	อาแกนไทต์	7.75
56	ควอตซ์	26.10
	แคลไซต์	32.13
	เคโอลิไนต์	23.63
	อาแกนไทต์	18.14

ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวสงขลากรณีหลังปรับปรุงด้วยสูตร RHA20RWA30 ที่
อายุบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน

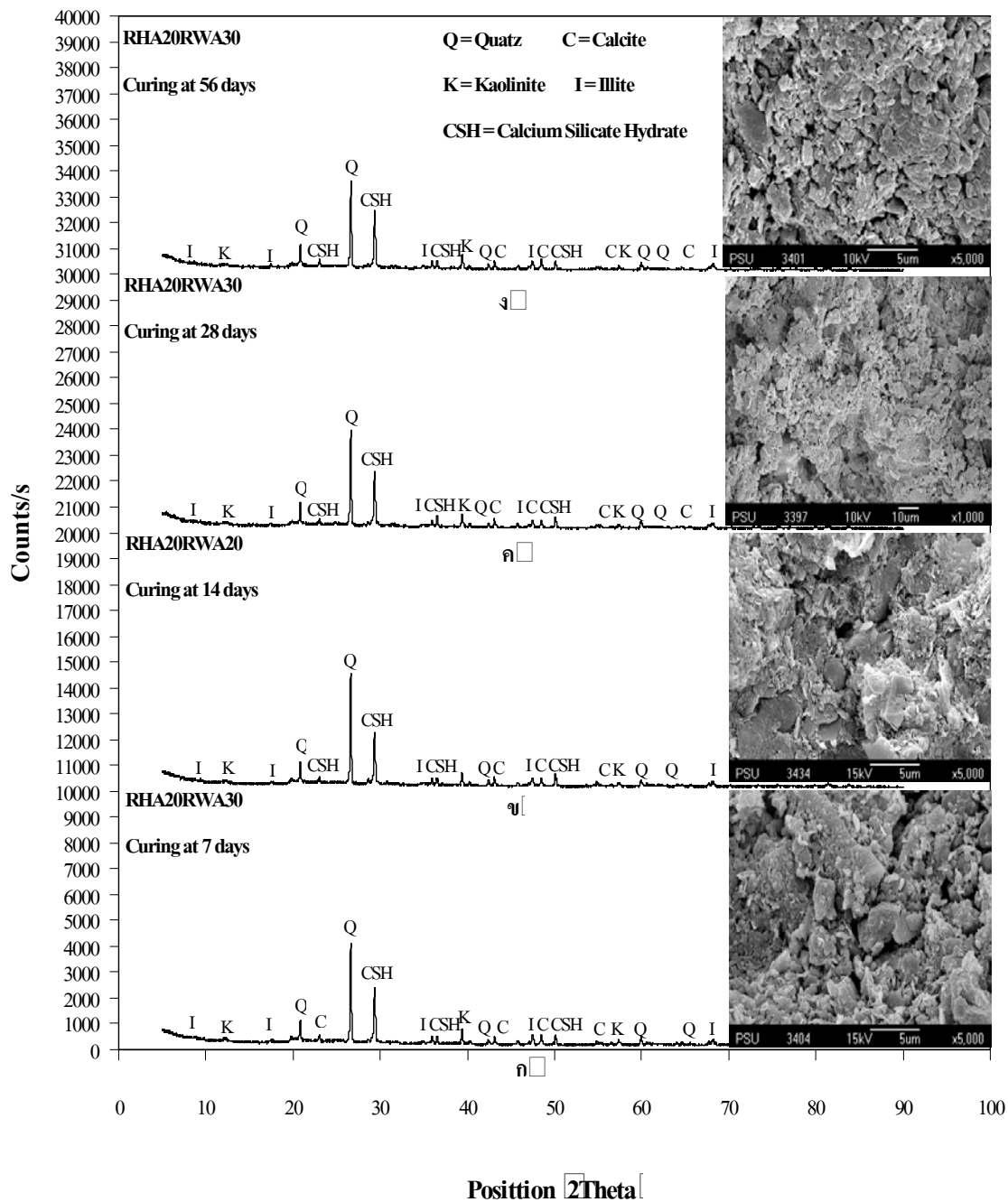
อายุการบ่ม วัน □	องค์ประกอบแร่	ปริมาณ % □
7	ควอตซ์	29.79
	แคลไซต์	17.93
	***แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	8.79
	เคโอลิไนต์	24.06
	อิลไลต์	19.43
14	ควอตซ์	27.88
	แคลไซต์	16.40
	***แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	10.68
	เคโอลิไนต์	25.66
	อิลไลต์	19.38
28	ควอตซ์	28.38
	แคลไซต์	19.06
	***แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	15.65
	เคโอลิไนต์	19.09
	อิลไลต์	17.82
56	ควอตซ์	26.08
	แคลไซต์	19.72
	***แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	16.03
	เคโอลิไนต์	20.45
	อิลไลต์	17.72



รูปที่ 4.56 ผลวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลากรณีหลังปรับปรุงด้วยสูตร RHA50SC50 ที่อายุบ่ม ก□7 วัน ข□14 วัน ค□28 วัน และ ง□56 วัน



รูปที่ 4.57 ผลวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลากรณีหลังปรับปรุงด้วยสูตร RWA50SC50 ที่อายุบ่ม ก [7 วัน ข [14 วัน ค [28 วัน และ ง [56 วัน



รูปที่ 4.58 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลากรณีหลังปรับปรุงด้วยสูตร RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม ก 7 วัน ข 14 วัน ค 28 วัน และ ง 56 วัน

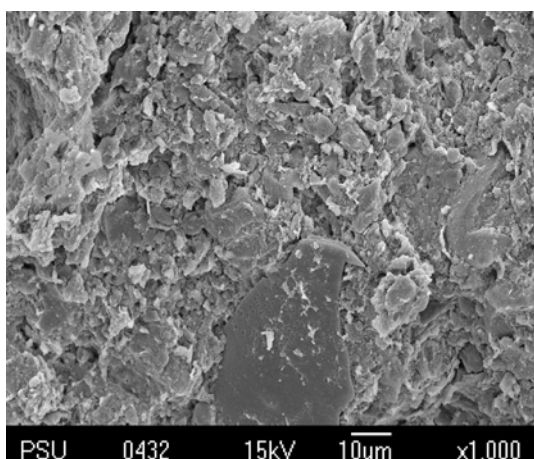
4.3.7 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวอ่อนสงขลากรณีหลังจากปรับปรุงสมบัติ

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวอ่อนสงขลากรณีหลังจากปรับปรุงสมบัติด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา โดยภาพถ่ายจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยศึกษาเฉพาะกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสูตร RHA50SC50 RWA50SC50 รวมทั้งผสมเถ้าทั้งสองชนิดคือ RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน โครงสร้างของดินเดิมมีลักษณะเป็นแผ่นจับกันหลวม ซึ่งประกอบไปด้วยแร่ควอตซ์ อิลไลต์และเคโอลิไนต์ซึ่งเป็นแร่หลักของดิน การที่ดินมีโครงสร้างที่จับกันหลวมทำให้ความสามารถในการรับแรงนั้นต่ำ

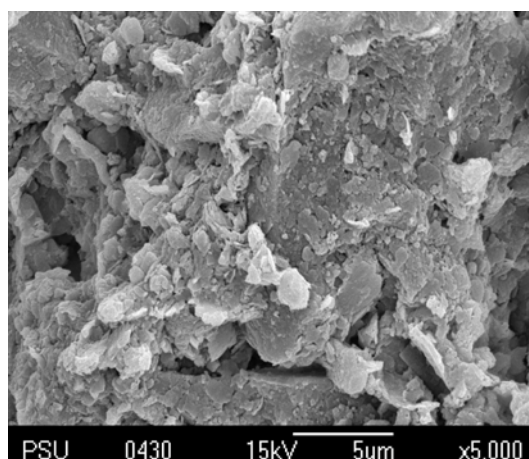
จากการวิเคราะห์กรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยสูตร RHA50SC50 ที่อายุบ่ม 7 วัน มีแร่เกิดขึ้นใหม่ คือ แคลไซต์และจาโรไซต์ ซึ่งเป็นแร่ที่แสดงว่ามีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานรวมถึงโครงสร้างของดินเริ่มมีลักษณะหนาแน่นขึ้นดังในรูปที่ 4.59 ที่อายุบ่ม 14 28 และ 56 วัน ลักษณะโครงสร้างของดินมีลักษณะหนาแน่นขึ้นเล็กน้อยตามอายุการบ่มดังรูปที่ 4.60 4.61 และ 4.62

จากการวิเคราะห์กรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยสูตร RWA50SC50 ที่อายุบ่ม 7 วัน พบแร่ที่เกิดขึ้นใหม่ คือ แคลไซต์และอาแคนไทต์ ซึ่งเป็นกลุ่มแร่ที่บ่งบอกว่าการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราดังในรูปที่ 4.55 รวมถึงโครงสร้างของดินมีลักษณะโครงสร้างหนาแน่นขึ้นเล็กน้อยดังในรูปที่ 4.63 ที่อายุบ่ม 14 วัน ลักษณะโครงสร้างของดินมีการยึดและจับกันแน่นขึ้นดังในรูปที่ 4.64 ที่อายุบ่ม 28 วัน ดินมีโครงสร้างที่ยึดแน่นขึ้น ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานและไฮเดรชันของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา ส่งผลให้พบแร่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นบางส่วนดังรูปที่ 4.65 ที่อายุบ่ม 56 วัน ดินมีการยึดแน่นกันมากขึ้นดังในรูปที่ 4.66

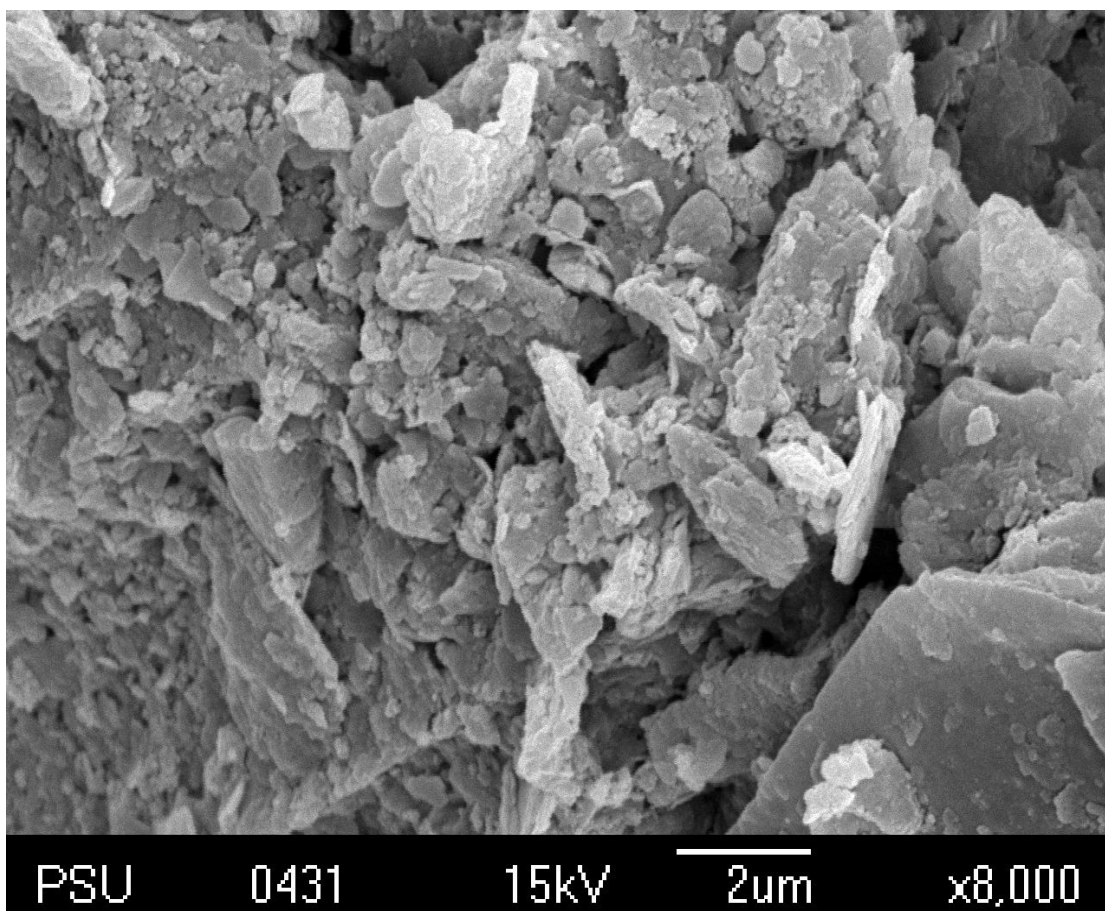
จากการวิเคราะห์กรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยสูตร RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 7 วัน ดินมีโครงสร้างที่เริ่มจับตัวกันแน่นขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและไฮเดรชันของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา โดยพบแร่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ดังในรูปที่ 4.67 ที่อายุบ่ม 14 วัน ลักษณะโครงสร้างของดินมีการยึดกันแน่นขึ้น เพราะว่าค่าของแร่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ดินปรับปรุงรับกำลังอัดและอัตราส่วนแรงแบกทานดังผลการทดสอบที่ได้กล่าวมาแล้ว ลักษณะโครงสร้างดินปรับปรุงดังในรูปที่ 4.68 เมื่อดินมีอายุบ่ม 28 วัน โครงสร้างของดินมีการยึดเกาะกันแน่นขึ้นอย่างชัดเจน เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและไฮเดรชันของเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา ได้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มมีการตรวจพบปริมาณของสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้นด้วย โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดังในรูปที่ 4.69 และเพื่อพิจารณาที่อายุบ่ม 56 วัน ลักษณะโครงสร้างของดินมีการยึดจับตัวกันแน่นขึ้นเป็นก้อนและมีผลึก เป็นผลจากการพัฒนาอย่างต่อเนื่องของแร่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตตามอายุบ่มดังในรูปที่ 4.70



ก □

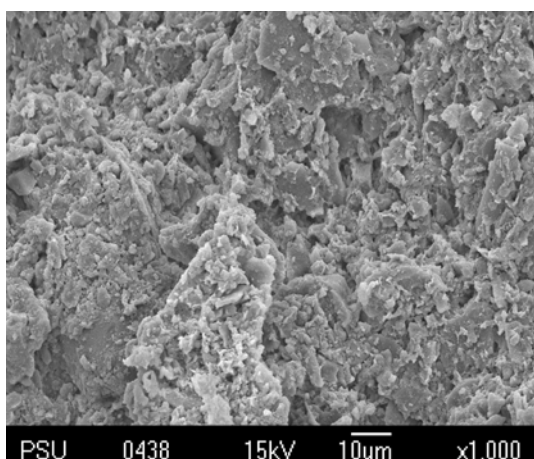


ข □

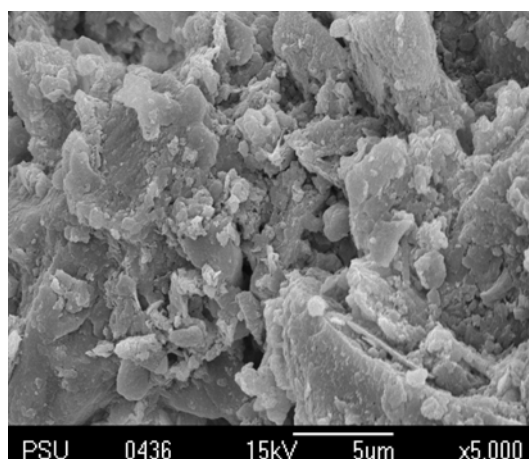


ค □

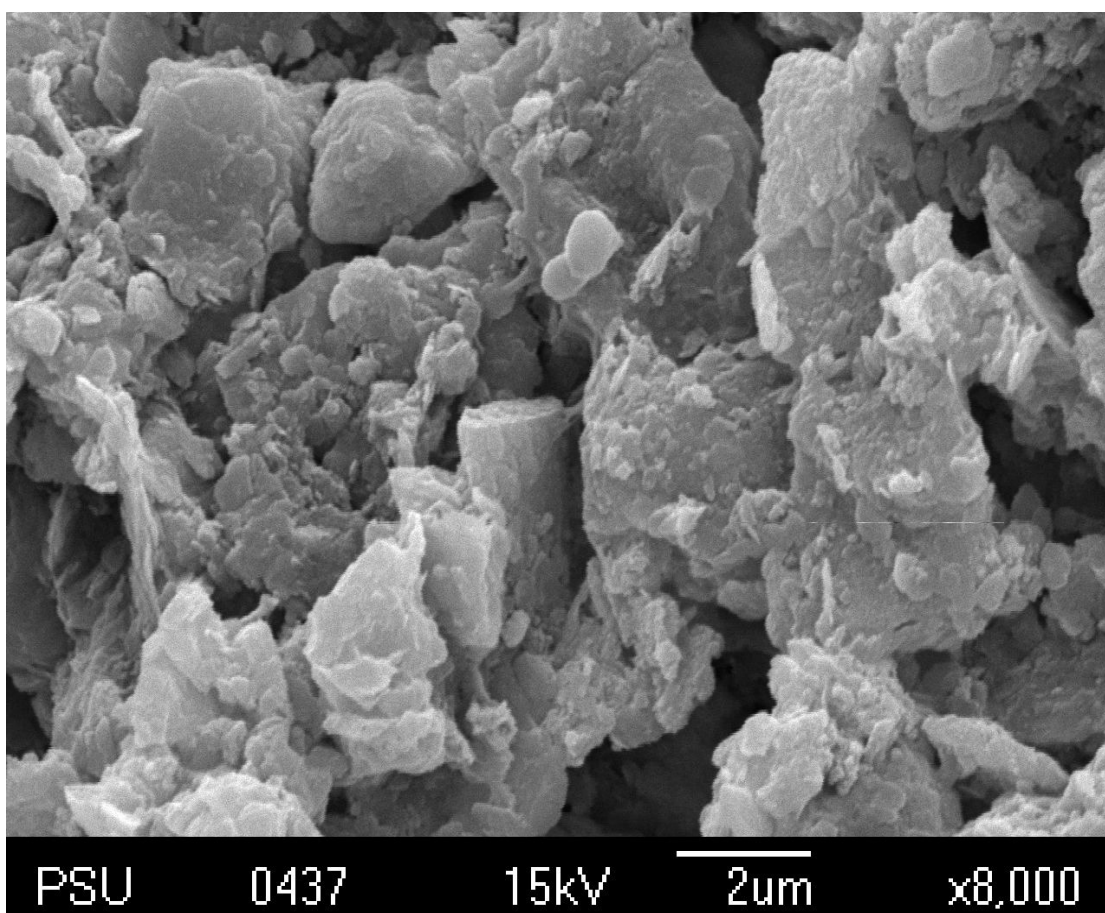
รูปที่ 4.59 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลาหลังปรับปรุงสมบัติด้วยสูตร RHA50SC50 ที่อายุ บ่ม 7 วัน ก □ กำลังขยาย 1000 เท่า ข □ กำลังขยาย 5000 เท่า และ ค □ กำลังขยาย 8000 เท่า



ก □

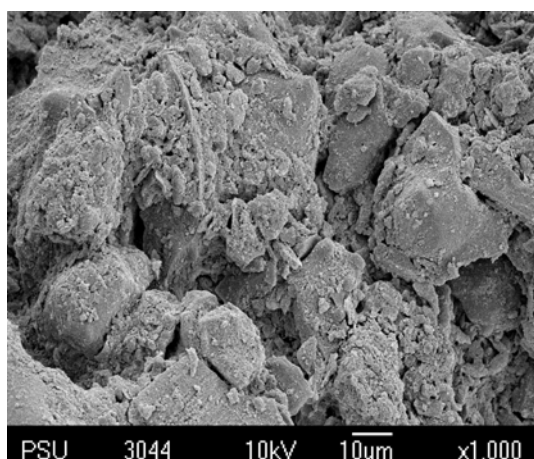


ข □

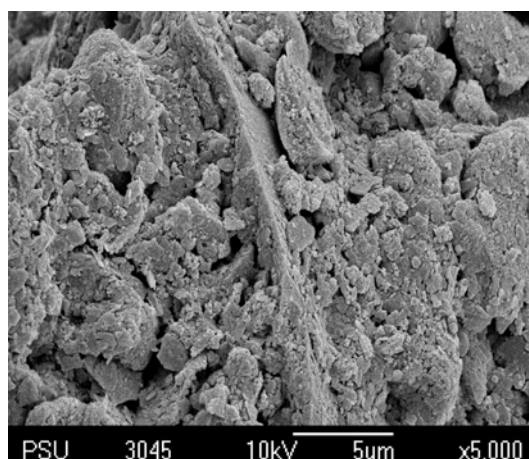


ค □

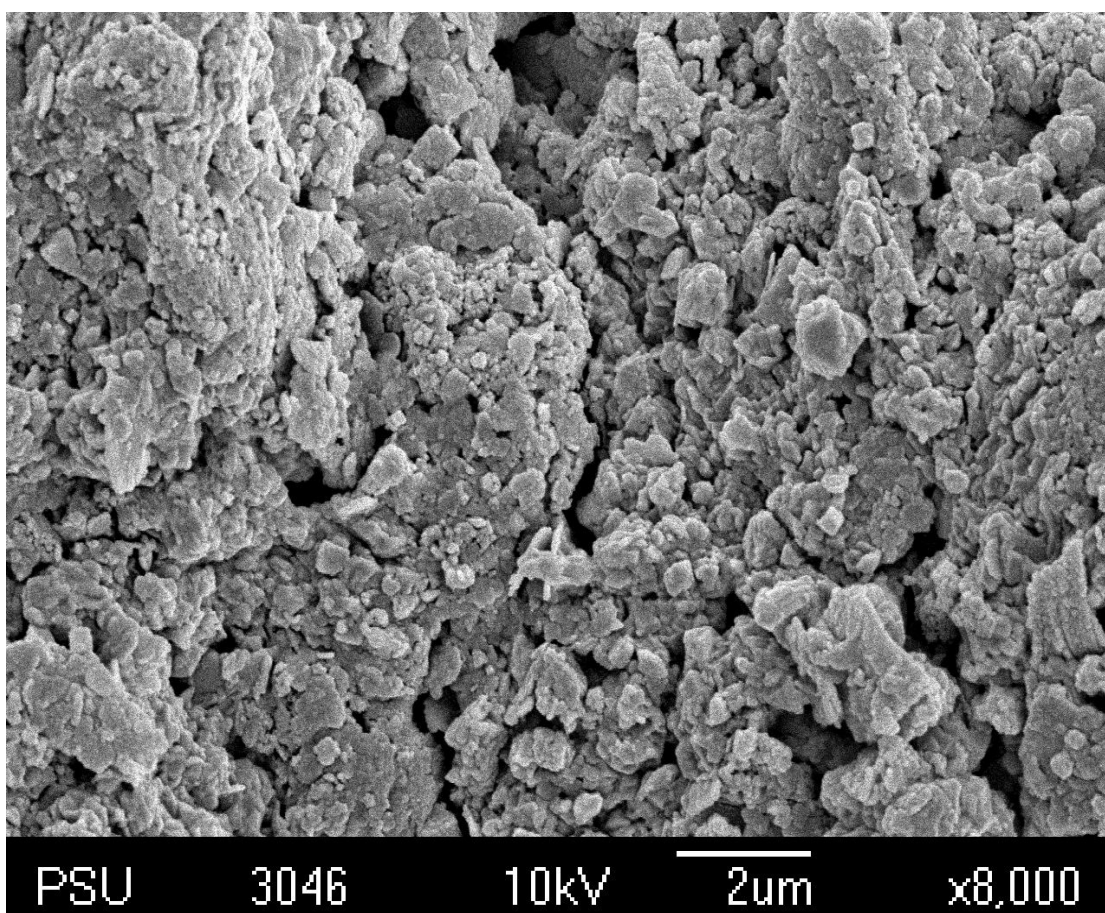
รูปที่ 4.60 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลาหลังปรับปรุงสมบัติด้วยสูตร RHA50SC50 ที่อายุ บ่ม 14 วัน ก) ถี้าลิ่งขยาย 1000 เท่า ข) ถี้าลิ่งขยาย 5000 เท่า และ ค) ถี้าลิ่งขยาย 8000 เท่า



ก □

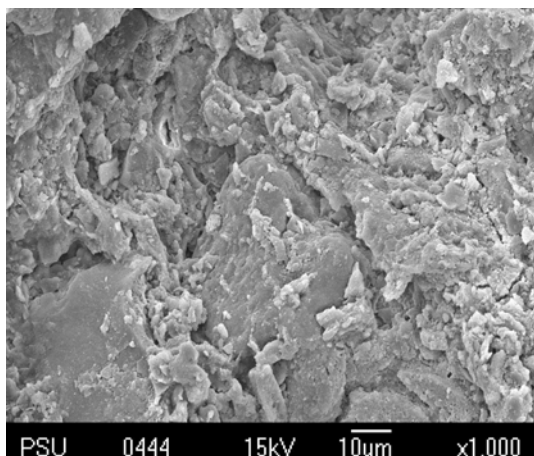


ข □

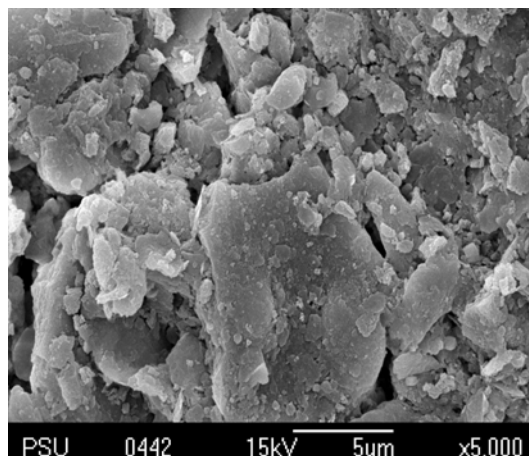


ค □

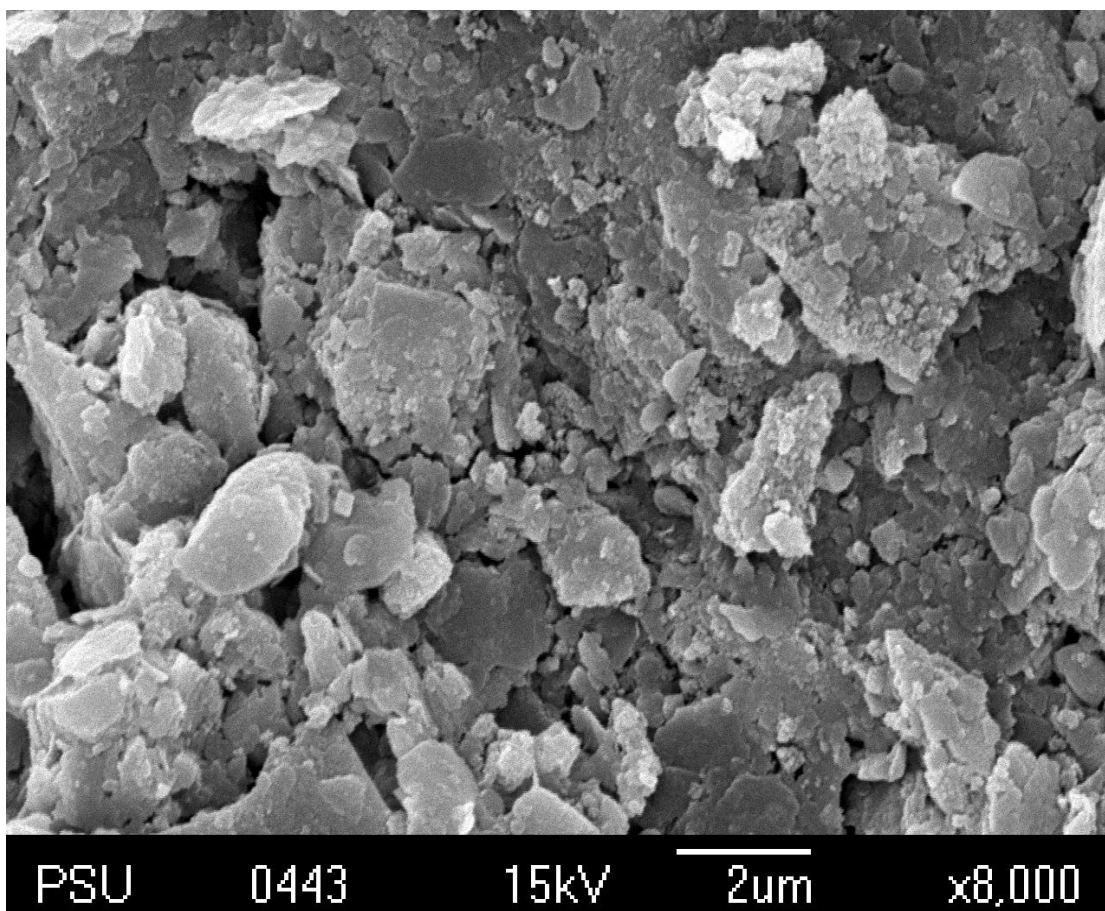
รูปที่ 4.61 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลาหลังปรับปรุงสมบัติด้วยสูตร RHA50SC50 ที่อายุ บ่ม 28 วัน ก □ ถาล้างขยาย 1000 เท่า ข □ ถาล้างขยาย 5000 เท่า และ ค □ ถาล้างขยาย 8000 เท่า



ก □

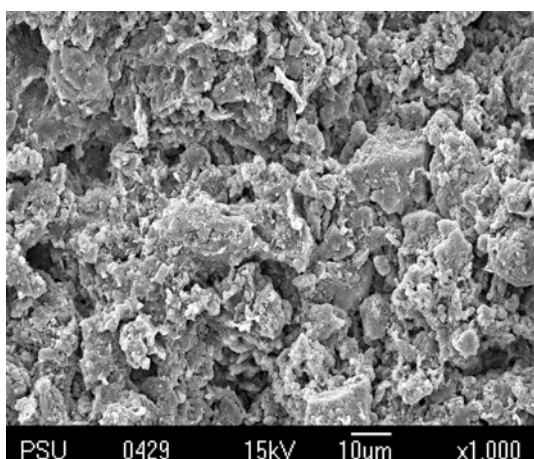


ข □

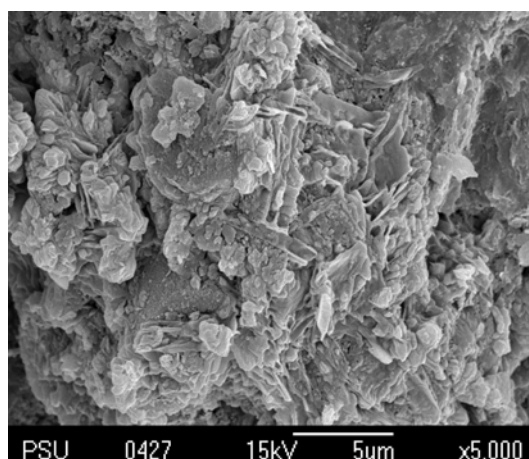


ค □

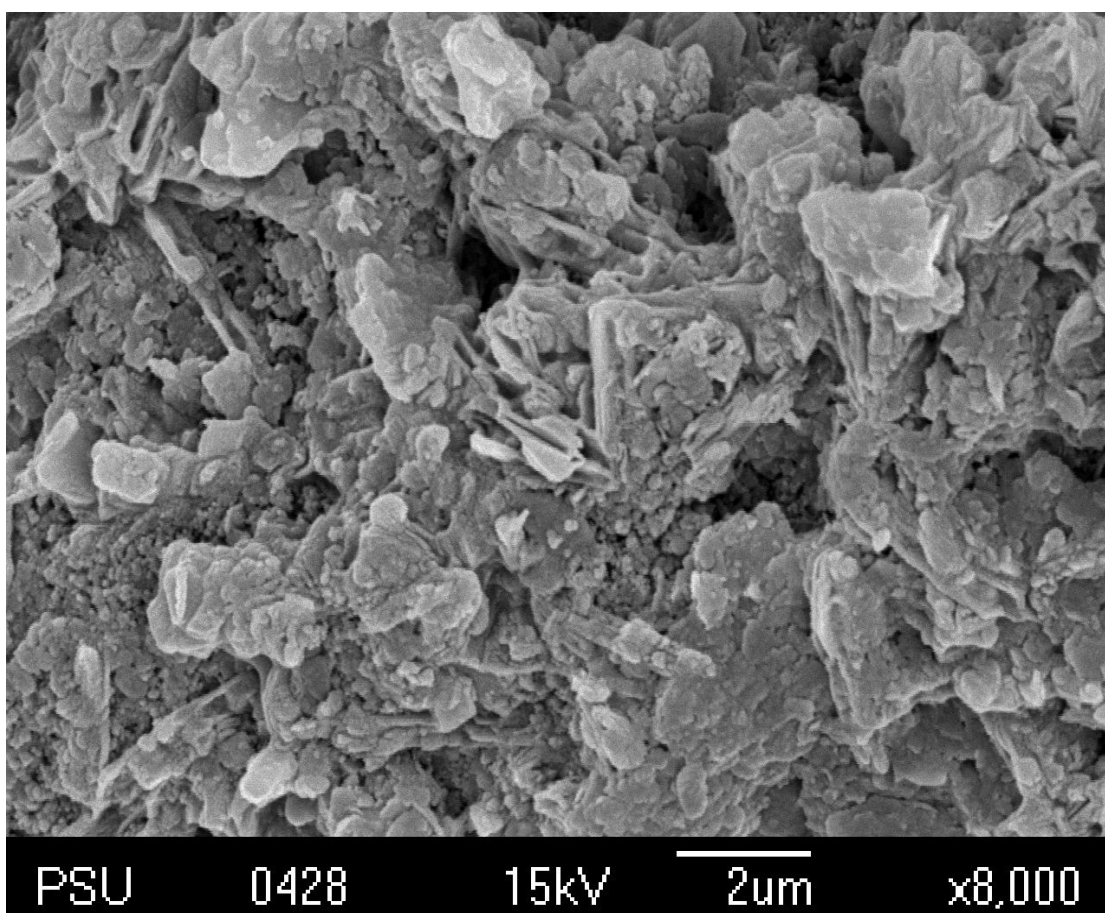
รูปที่ 4.62 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลาหลังปรับปรุงสมบัติด้วยสูตร RHA50SC50 ที่อายุ บ่ม 56 วัน ก □ กำลังขยาย 1000 เท่า ข □ กำลังขยาย 5000 เท่า และ ค □ กำลังขยาย 8000 เท่า



ก □

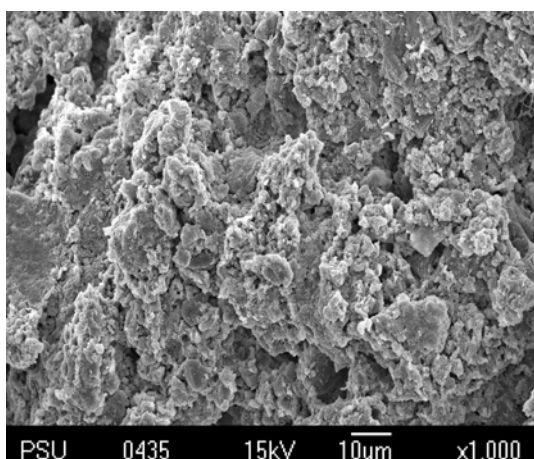


ข □

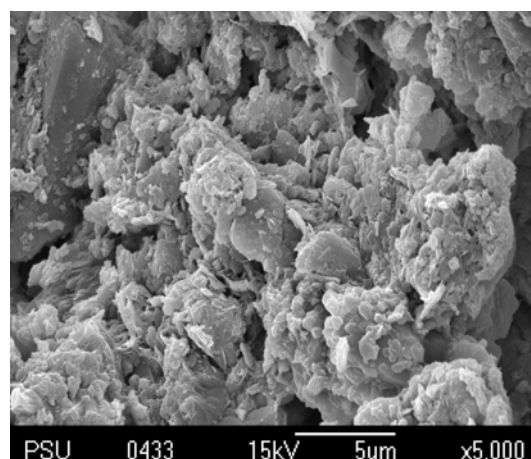


ค □

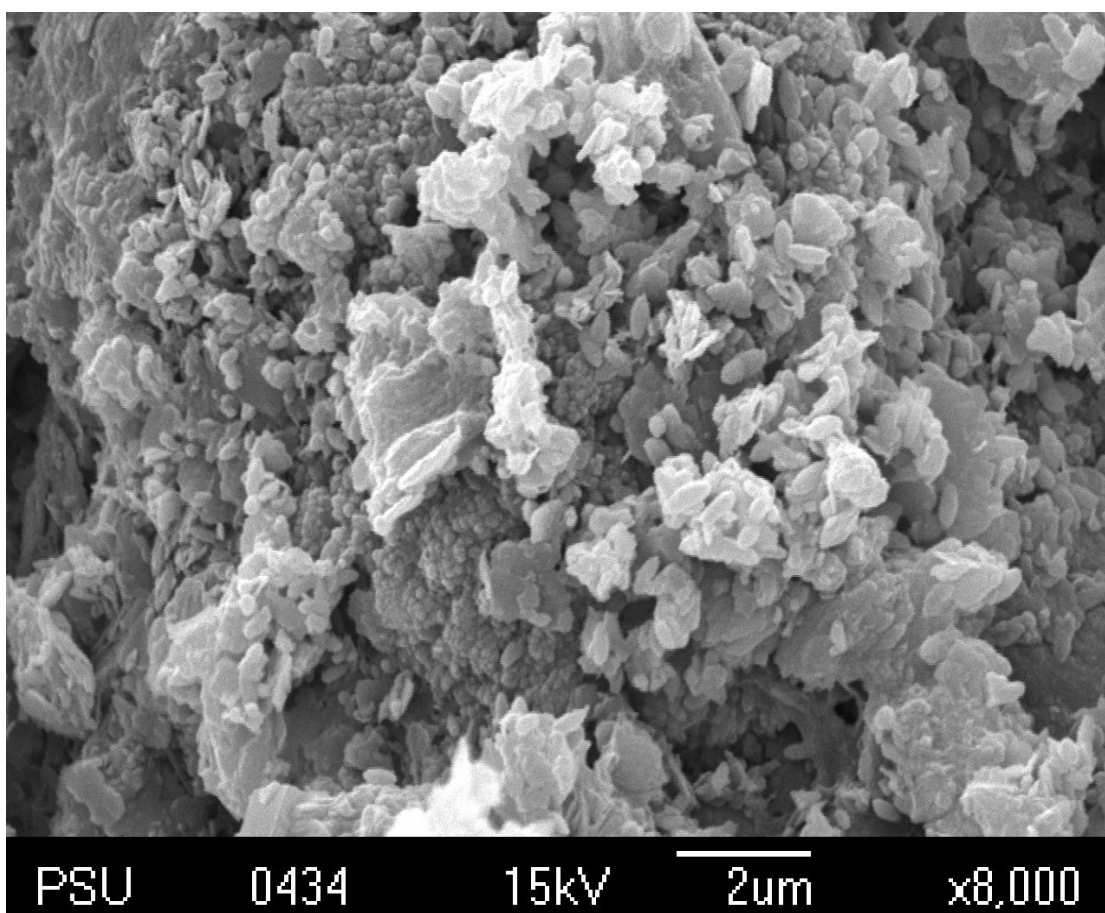
รูปที่ 4.63 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลาหลังปรับปรุงสมบัติด้วยสูตร RWA50SC50 ที่อายุ บ่ม 7 วัน ก □ กำลังขยาย 1000 เท่า ข □ กำลังขยาย 5000 เท่า และ ค □ กำลังขยาย 8000 เท่า



ก □

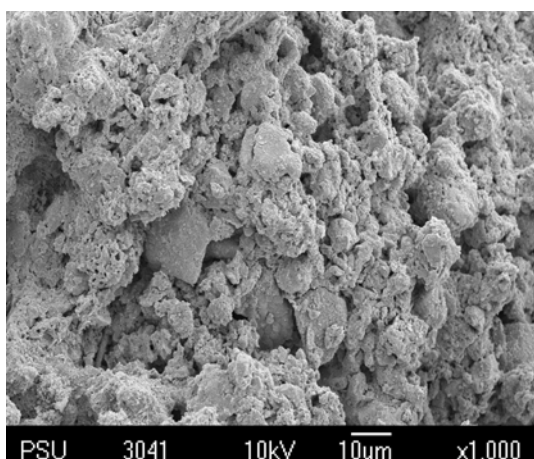


ข □

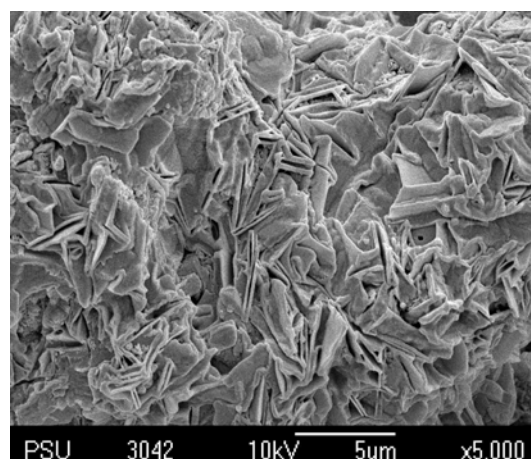


ค □

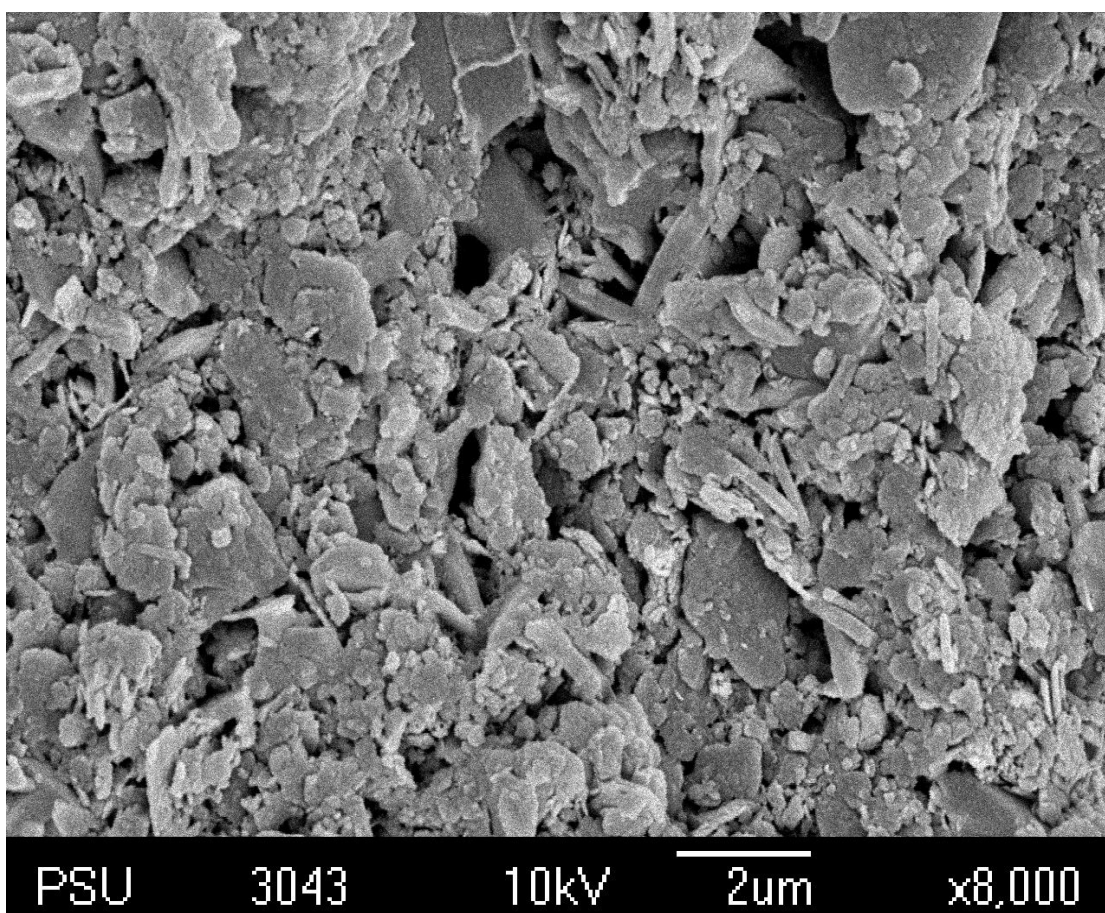
รูปที่ 4.64 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลาหลังปรับปรุงสมบัติด้วยสูตร RWA50SC50 ที่อายุ บ่ม 14 วัน ก □ ถัดล่างขยาย 1000 เท่า ข □ ถัดล่างขยาย 5000 เท่า และ ค □ ถัดล่างขยาย 8000 เท่า



ก □

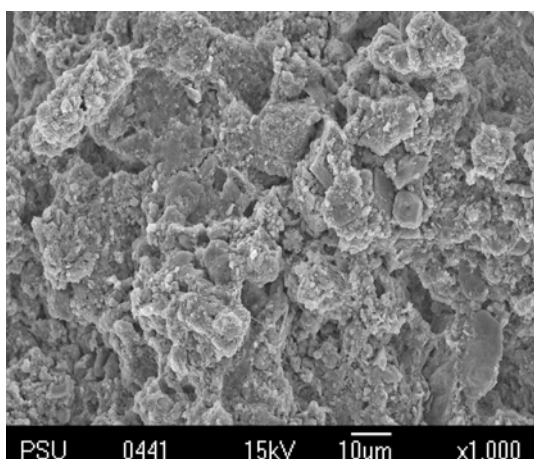


ข □

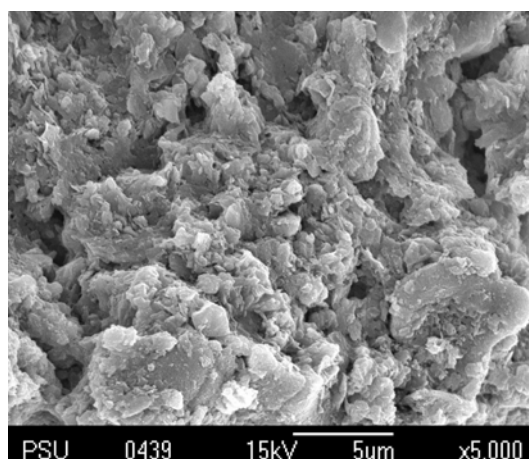


ค □

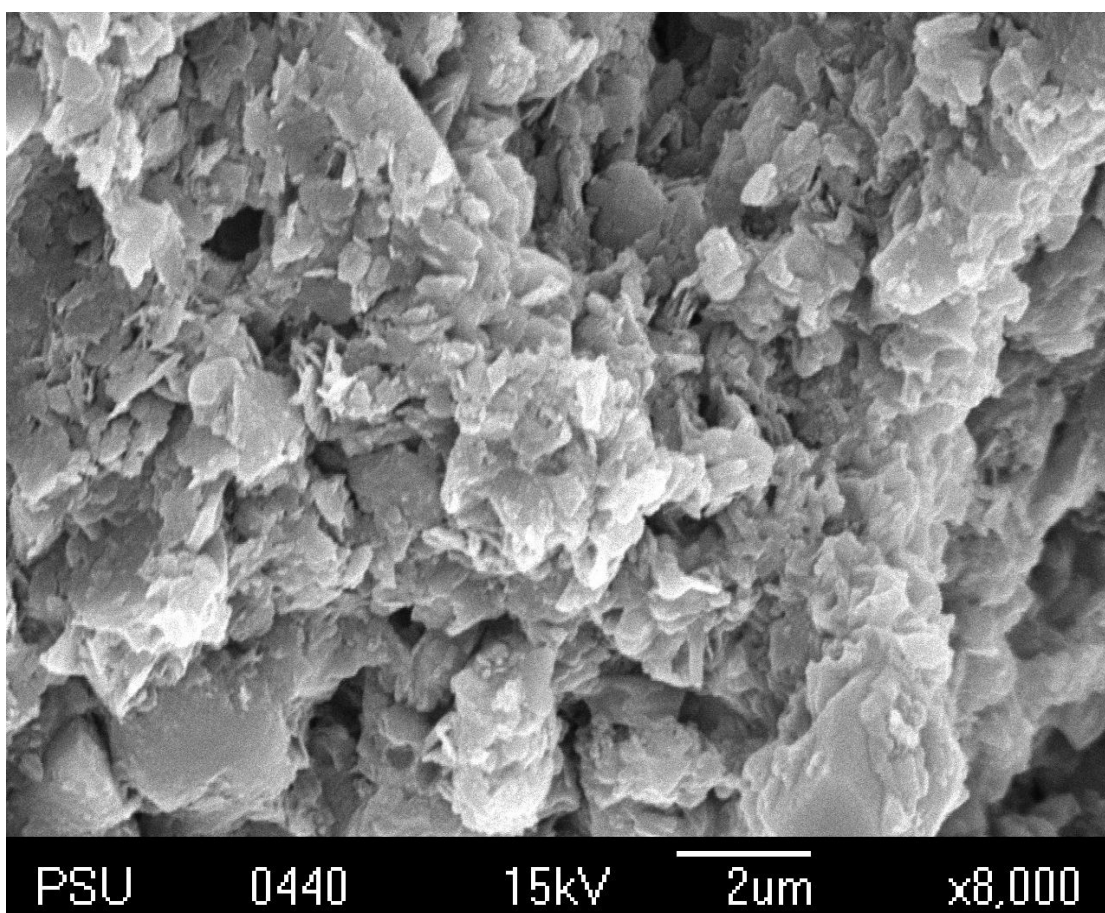
รูปที่ 4.65 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลาหลังปรับปรุงสมบัติด้วยสูตร RWA50SC50 ที่อายุ บ่ม 28 วัน ก)กำลังขยาย 1000 เท่า ข)กำลังขยาย 5000 เท่า และ ค)กำลังขยาย 8000 เท่า



ก □

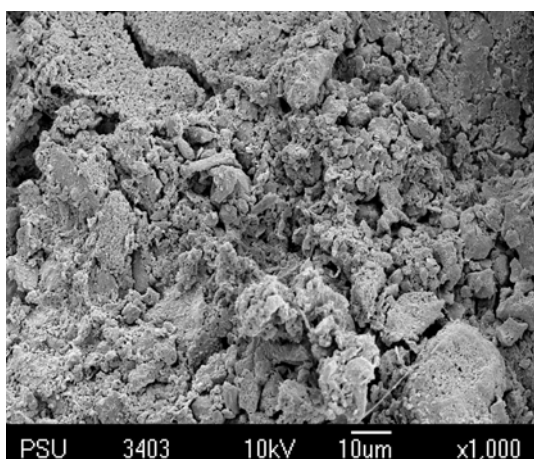


ข □

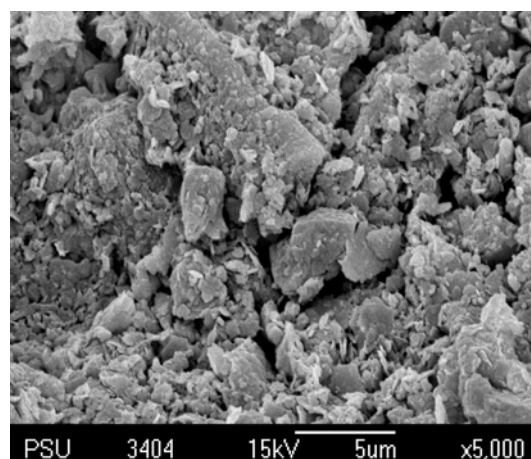


ค □

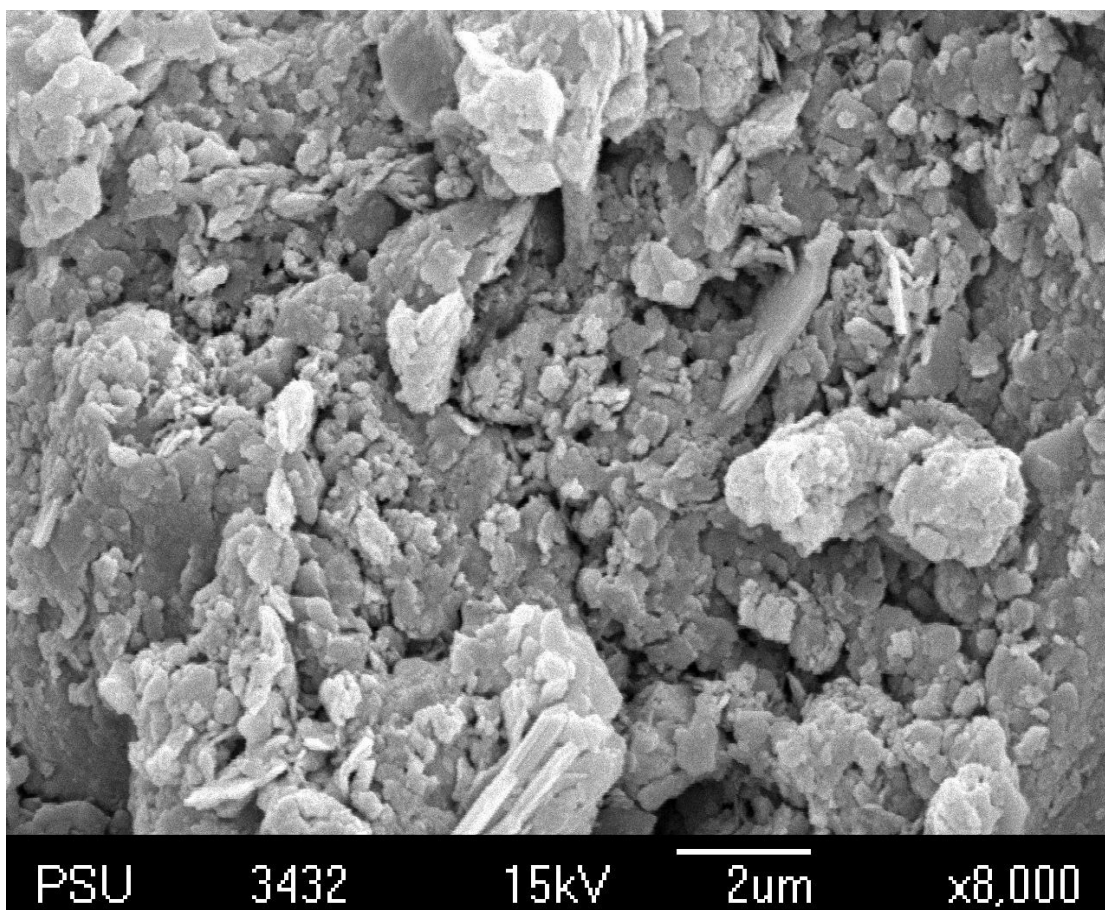
รูปที่ 4.66 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลาหลังปรับปรุงสมบัติด้วยสูตร RWA50SC50 ที่อายุ บ่ม 56 วัน ก □ กำลังขยาย 1000 เท่า ข □ กำลังขยาย 5000 เท่า และ ค □ กำลังขยาย 8000 เท่า



ก □

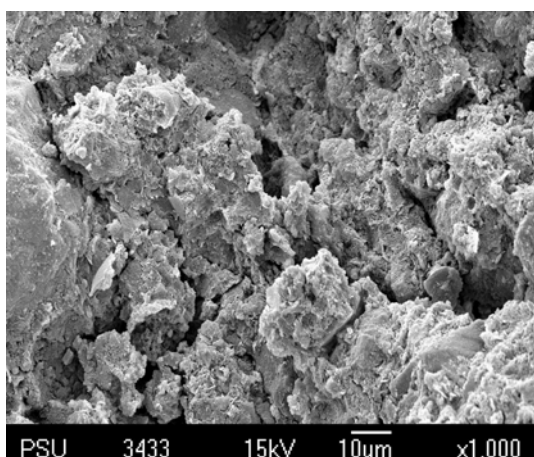


ข □

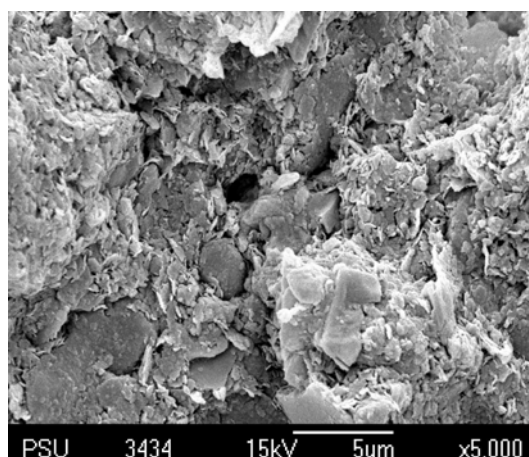


ค □

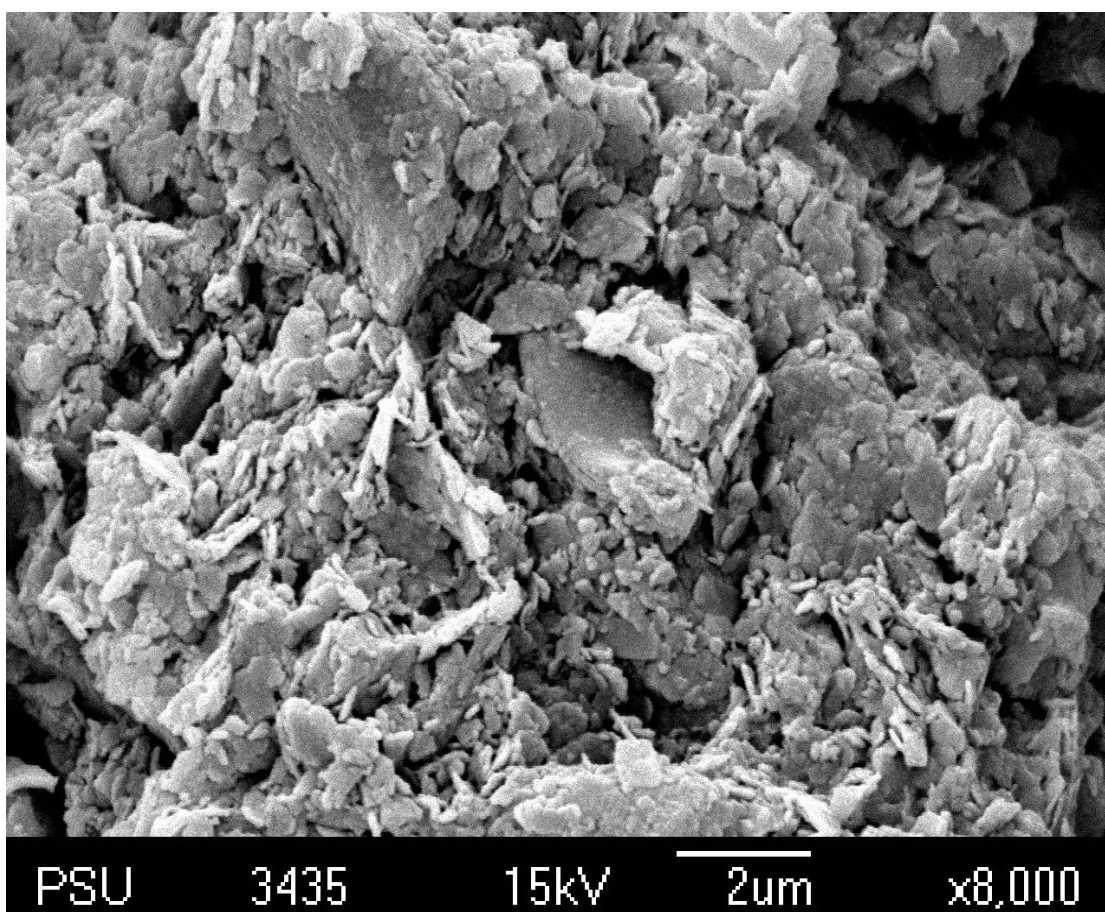
รูปที่ 4.67 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลาหลังปรับปรุงสมบัติด้วยสูตร RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 7 วัน ก □ กำลังขยาย 1000 เท่า ข □ กำลังขยาย 5000 เท่า และ ค □ กำลังขยาย 8000 เท่า



ก □

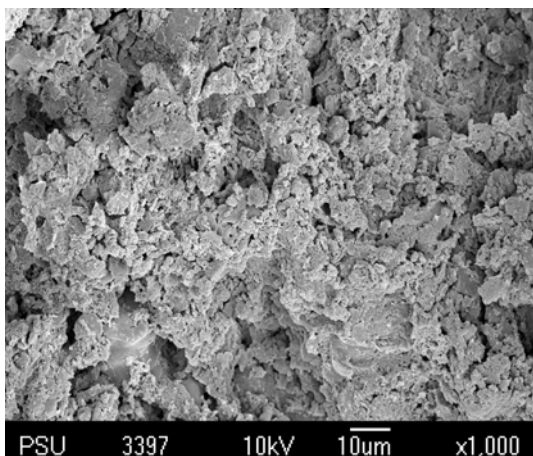


ข □

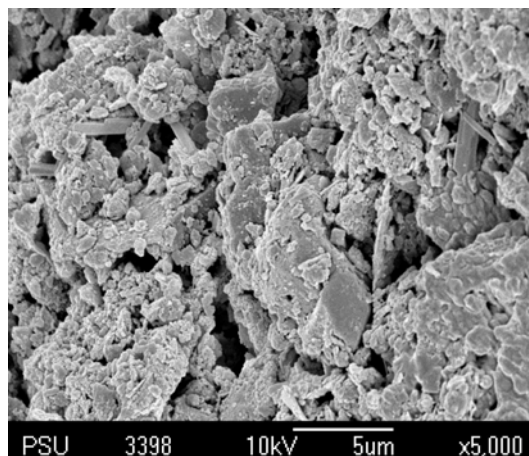


ค □

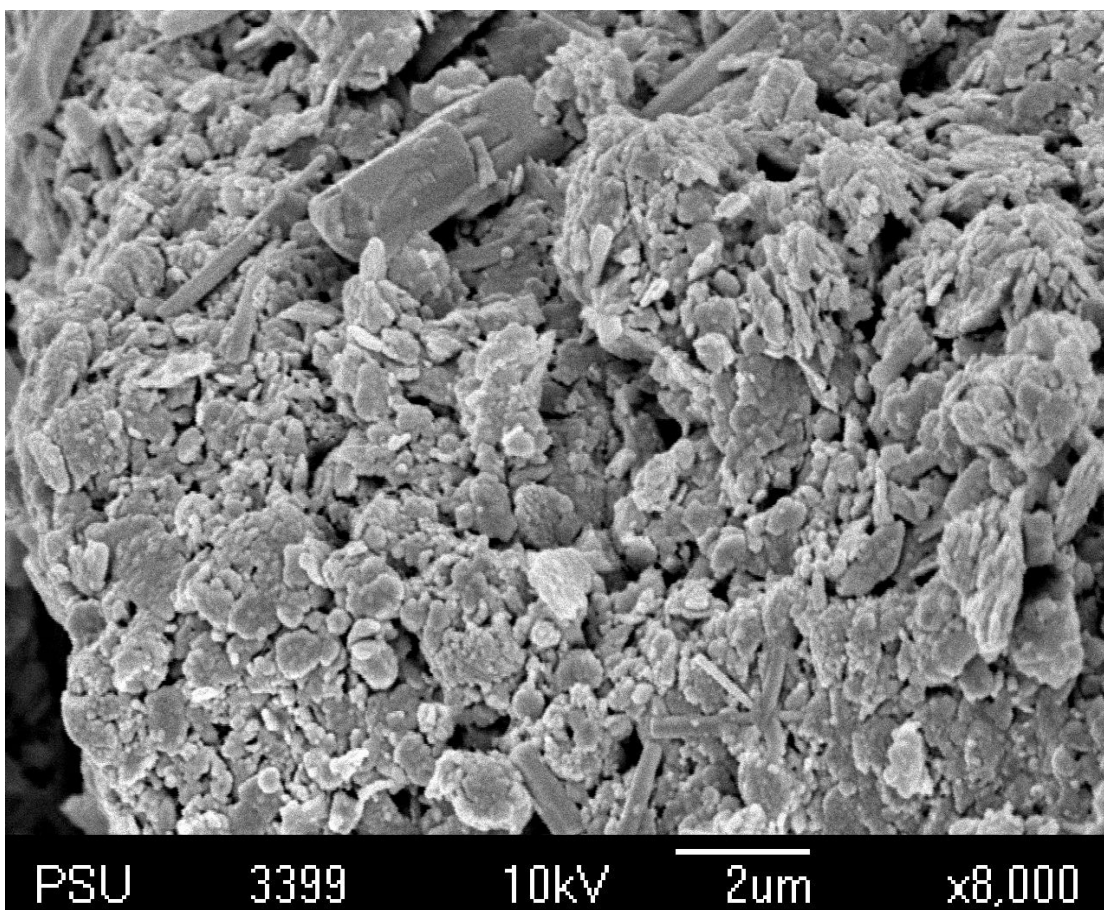
รูปที่ 4.68 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลาหลังปรับปรุงสมบัติด้วยสูตร RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 14 วัน ก □ กำลังขยาย 1000 เท่า ข □ กำลังขยาย 5000 เท่า และ ค □ กำลังขยาย 8000 เท่า



ก □

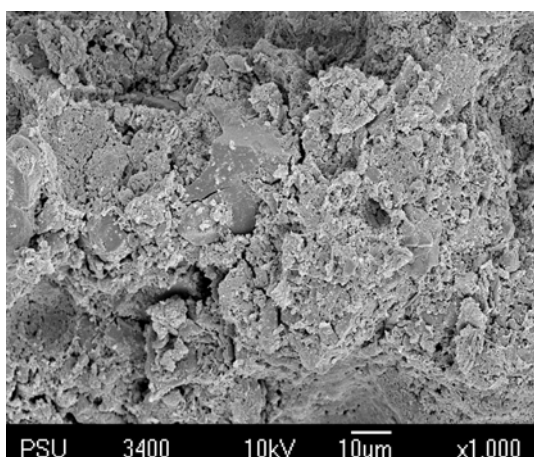


ข □

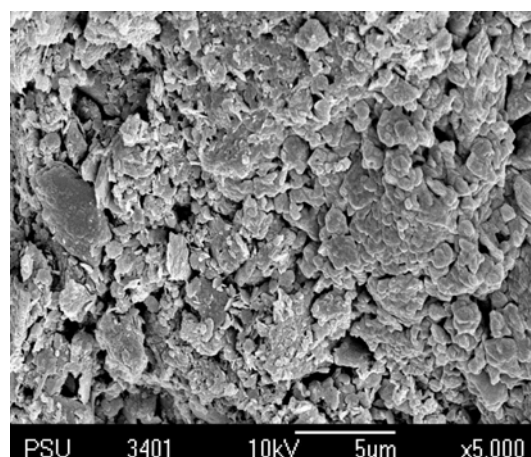


ค □

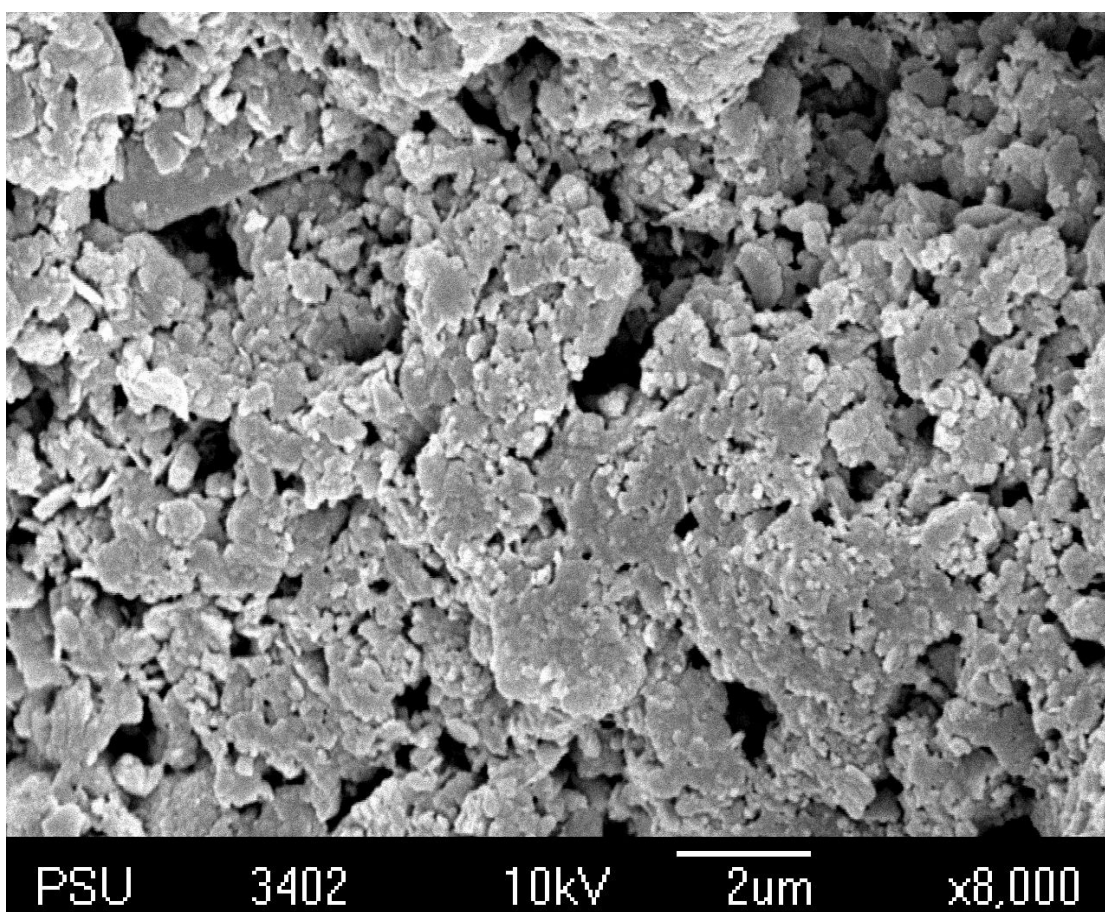
รูปที่ 4.69 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลาหลังปรับปรุงสมบัติด้วยสูตร RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 28 วัน ก □ กำลังขยาย 1000 เท่า ข □ กำลังขยาย 5000 เท่า และ ค □ กำลังขยาย 8000 เท่า



ก □



ข □



ค □

รูปที่ 4.70 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวสงขลาหลังปรับปรุงสมบัติด้วยสูตร RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 56 วัน ก □ กำลังขยาย 1000 เท่า ข □ กำลังขยาย 5000 เท่า และ ค □ กำลังขยาย 8000 เท่า

4.4 ผลวิเคราะห์ทางสถิติด้วยสหสัมพันธ์พหุคูณ Multiple Variable Regression

การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสมบัติทางวิศวกรรม จากการทดสอบ Unconfined Compression Test ด้วยสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Variable Regression เพื่อสร้างสมการถดถอย ที่แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปร การวิเคราะห์ใช้โปรแกรม SPSS 16.0 (Statistical Package for Social Science ซึ่งค่าความน่าเชื่อถือของสมการถดถอยแสดงในรูปของค่า Multiple Coefficient of Determination (R^2 โดยค่าของตัวแปร ประกอบด้วย

- 1 กำลังอัดแกนเดียว (UCS (กก./ซม.²
- 2 โมดูลัสของความยืดหยุ่น (E_{50} (กก./ซม.²
- 3 ความเครียดที่จุดวิบัติ (ϵ_f (%)
- 4 หน่วยน้ำหนักรวม (γ_t (กก./ม.³
- 5 ดัชนีพลาสติก (PI
- 6 ความถ่วงจำเพาะ (G_s
- 7 ปริมาณความชื้น (ω (%)
- 8 อายุการบ่ม (T (วัน
- 9 ปริมาณของเถ้าเคลือบ (RHA (%) เถ้าเคลือบแทนที่
- 10 ปริมาณของเถ้าไม้ยางพารา (RWA (%) เถ้าไม้ยางแทนที่

สำหรับการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรทำการจำแนกค่า R^2 แนะนำโดย

Draper and Smith (1966

$R^2 < 0.25$	มีความสัมพันธ์กันน้อย
$R^2 = 0.25 - 0.55$	มีความสัมพันธ์กึ่งปานกลาง
$R^2 = 0.55 - 0.80$	มีความสัมพันธ์กันดี
$R^2 > 0.80$	มีความสัมพันธ์กันดีมาก

จากการวิเคราะห์ทางสถิติภาครวมทุกอัตราส่วน การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่า UCS กับค่าต่างๆ มีความสัมพันธ์กันดีมาก ค่า $R^2 = 0.629$ ดังแสดงในตารางที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของค่า E_{50} กับค่าสมบัติต่างๆ มีความสัมพันธ์กันดี ค่า $R^2 = 0.724$ ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 4.16 และความสัมพันธ์ของค่า ϵ_f กับค่าต่างๆ มีความสัมพันธ์กันดีมาก ค่า $R^2 = 0.829$ ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 4.17 ซึ่งจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่า UCS กับค่าสมบัติต่างๆ มีความน่าเชื่อถือ น้อยที่สุดส่วนความสัมพันธ์ของค่า ϵ_f กับค่าสมบัติต่างๆ มีความน่าเชื่อถือมากที่สุด

ตารางที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของค่า UCS กับค่าสมบัติต่างๆ (วิเคราะห์ภาครวมทุกอัตราส่วน □)

Equation Model	Regression Equation	R ²
Linear	UCS=0.002PI-2.422Gs.+0.006 γ_t -0.194 ω +0.021T+0.108RHA +0.064RWA+2.687	0.629

ตารางที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของค่า E₅₀ กับค่าสมบัติต่างๆ (วิเคราะห์ภาครวมทุกอัตราส่วน □)

Equation Model	Regression Equation	R ²
Linear	E ₅₀ =0.086PI-58.216Gs.-0.125 γ_t -7.116 ω +0.846T+3.006RHA +2.15RWA+143.407	0.724

ตารางที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของค่า ϵ_f กับค่าสมบัติต่างๆ (วิเคราะห์ภาครวมทุกอัตราส่วน □)

Equation Model	Regression Equation	R ²
Linear	ϵ_f =-0.067PI+0.649Gs.-0.005 γ_t -0.025 ω -0.441T-0.050RHA -0.083RWA+8.927	0.829

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบทางสถิติแบบการถดถอยเชิงเส้นของแต่ละอัตราส่วน เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่า UCS กับค่าสมบัติต่างๆ มีความสัมพันธ์กันดีถึงดีมาก ค่า R² 0.602–1.000 ดังแสดงในตารางที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของค่า E₅₀ กับค่าสมบัติต่างๆ มีความสัมพันธ์กันดีจนถึงดีมาก ค่า R² 0.607–1.000 ดังแสดงในตารางที่ 4.19 และความสัมพันธ์ของค่า ϵ_f กับค่าสมบัติต่างๆ มีความสัมพันธ์กันดีจนถึงดีมาก ค่า R² 0.692–0.990 ดังแสดงในตารางที่ 4.20 ซึ่งจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์กันดีมาก

ตารางที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของค่า UCS กับค่าสมบัติต่างๆ (วิเคราะห์แยกแต่ละอัตราส่วน □)

สัญลักษณ์	Regression Equation	R ²
SC	$UCS=1.012 \gamma_t + 0.006 \omega + 0.001T + 0.292$	1.000
RHA5SC95	$UCS=0.002 \gamma_t - 0.276 \omega + 0.007T + 5.370$	0.783
RHA10SC90	$UCS=-0.001 \gamma_t - 2.742 \omega - 0.003T + 82.087$	0.850
RHA15SC85	$UCS=-0.002 \gamma_t - 1.592 \omega - 0.002T + 50.109$	0.994
RHA20SC80	$UCS=-4.431 \omega - 0.015T$	0.966
RHA25SC75	$UCS=0.008 \gamma_t - 0.600 \omega + 0.001T$	0.946
RHA30SC70	$UCS=0.006 \gamma_t - 867 \omega - 0.004T + 24.351$	0.886
RHA35SC65	$UCS=0.008 \gamma_t - 3.579 \omega - 0.010T + 139.914$	0.873
RHA40SC60	$UCS=0.077 \gamma_t - 10.994 \omega - 0.020T + 491.968$	0.963
RHA50SC50	$UCS=-0.049 \gamma_t - 1.988 \omega - 0.022T - 136.435$	0.998
RWA5SC95	$UCS=-0.029 \gamma_t - 1.636 \omega + 0.004T + 90.031$	0.895
RWA10SC90	$UCS=-0.006 \gamma_t - 3.497 \omega - 0.019T + 108.322$	0.797
RWA15SC85	$UCS=0.002 \gamma_t - 1.485 \omega - 0.003T + 40.574$	0.950
RWA20SC80	$UCS=0.006 \gamma_t - 1.862 \omega + 45.670$	0.966
RWA25SC75	$UCS=0.004 \gamma_t - 2.532 \omega - 0.005T + 66.674$	0.907
RWA30SC70	$UCS=0.006 \gamma_t - 2.540 \omega - 0.006T + 64.041$	0.714
RWA35SC65	$UCS=0.004 \gamma_t - 2.500 \omega + 64.227$	0.761
RWA40SC60	$UCS=0.001 \gamma_t - 1.519 \omega + 0.006T + 41.430$	0.648
RWA50SC50	$UCS=-0.071 \gamma_t - 17.699 \omega - 0.320T + 572.015$	0.633
RHA5RWA5	$UCS=0.003 \gamma_t - 1.265 \omega - 0.001T + 32.709$	0.987
RHA5RWA10	$UCS=-0.015 \gamma_t - 3.376 \omega - 0.011T + 116.891$	0.991
RHA10RWA5	$UCS=-0.011 \gamma_t - 2.375 \omega - 0.003T + 83.626$	0.863
RHA5RWA15	$UCS=-0.006 \gamma_t - 5.019 \omega + 152.423$	0.989
RHA10RWA10	$UCS=+0.021 \gamma_t - 2.426 \omega - 0.012T + 47.452$	0.998
RHA15RWA5	$UCS=-0.009 \gamma_t - 3.935 \omega - 0.011T - 135.021$	0.968
RHA5RWA20	$UCS=-276 \gamma_t + 2.710 \omega - 0.022T + 284.079$	0.959

ตารางที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของค่า UCS กับค่าสมบัติต่างๆ (วิเคราะห์แยกแต่ละอัตราส่วน ω ต่อ γ_t)

สัญลักษณ์	Regression Equation	R ²
RHA10RWA15	UCS=0.027 γ_t -8.45 ω -0.028T+209.528	0.988
RHA15RWA10	UCS=-0.043 γ_t +0.039 ω -0.010T+53.971	0.999
RHA20RWA5	UCS=0.001 γ_t +2.595 ω -0.083T-83.724	1.000
RHA5RWA25	UCS=-0.024 γ_t -8.962 ω -0.059T+291.388	0.998
RHA10RWA20	UCS=0.016 γ_t -0.555 ω -0.002T-3.262	0.602
RHA15RWA15	UCS=-0.008 γ_t -4.678 ω -0.022T-155.218	0.938
RHA20RWA10	UCS=-0.065 γ_t -12.071 ω -0.036T+481.733	0.910
RHA25RWA5	UCS=0.004 γ_t -1.564 ω -0.006T+49.622	0.851
RHA5RWA30	UCS=0.040 γ_t -8.521 ω -0.03T+202.216	0.947
RHA15RWA20	UCS=-0.023 γ_t -3.145 ω -0.017T+127.577	0.937
RHA20RWA15	UCS=-0.018 γ_t -4.622 ω -0.022T+171.090	0.996
RHA30RWA5	UCS=-0.034 γ_t -13.492 ω -0.062T+497.580	0.935
RHA5RWA35	UCS=-4.989 ω -0.023T-149.484	0.985
RHA10RWA30	UCS=-0.040 γ_t -8.218 ω +0.008T+297.076	0.879
RHA20RWA20	UCS=-0.028 γ_t -6.795 ω -0.080T+186.241	0.793
RHA30RWA10	UCS=0.008 γ_t -3.808 ω -0.029T+125.926	0.990
RHA35RWA5	UCS=-0.013 γ_t -6.196 ω -0.008T+240.606	0.909
RHA10RWA40	UCS=-0.114 γ_t -16.659 ω +0.024T+652.142	0.860
RHA20RWA30	UCS=0.022 γ_t -10.555 ω -0.014T+374.032	0.865
RHA25RWA25	UCS=0.032 γ_t -4.454 ω -0.041T+117.993	0.966
RHA30RWA20	UCS=0.037 γ_t -1.714 ω -0.018T+21.705	0.907
RHA40RWA10	UCS=0.022 γ_t -4.106 ω +0.013T+185.134	0.997

ตารางที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของค่า E_{50} กับค่าสมบัติต่างๆ (วิเคราะห์แยกแต่ละอัตราส่วน) □

สัญลักษณ์	Regression Equation	R ²
SC	$E_{50}=0.018 \gamma_t -0.228 \omega +0.012T-16.457$	0.771
RHA5SC95	$E_{50}=-0.230 \gamma_t -20.635 \omega +0.270T+914.843$	0.920
RHA10SC90	$E_{50}=-0.638 \gamma_t -157.809 \omega +0.094T+5422.691$	0.877
RHA15SC85	$E_{50}=-0.053 \gamma_t -37.322 \omega +0.237T+1230.586$	0.617
RHA20SC80	$E_{50}=-2.215 \gamma_t +51.625 \omega +2.903T+1083.265$	0.966
RHA25SC75	$E_{50}=0.529 \gamma_t +60.379 \omega +0.695T-2668.972$	0.646
RHA30SC70	$E_{50}=0.216 \gamma_t +53.180 \omega +0.674T-2127.548$	0.886
RHA35SC65	$E_{50}=0.090 \gamma_t +27.31 \omega +0.668T-1081.601$	0.873
RHA40SC60	$E_{50}=-5.504 \gamma_t -487.52 \omega -0.575T+24145.130$	0.663
RHA50SC50	$E_{50}=1.226 \gamma_t +172.581 \omega +1.162T-8467.935$	0.668
RWA5SC95	$E_{50}=-1.184 \gamma_t -34.454 \omega +0.141T+2731.301$	0.893
RWA10SC90	$E_{50}=3512.033 \gamma_t -0.318 \omega -108.117T+3512.033$	0.837
RWA15SC85	$E_{50}=0.271 \gamma_t -95.66 \omega -0.380T+3083.206$	0.865
RWA20SC80	$E_{50}=0.020 \gamma_t -14.747 \omega +0.412T +401.480$	0.666
RWA25SC75	$E_{50}=-0.164 \gamma_t -83.662 \omega -0.371T+2576.316$	0.907
RWA30SC70	$E_{50}=-0.195 \gamma_t -166.800 \omega -0.994T+4904.255$	0.998
RWA35SC65	$E_{50}=-0.485 \gamma_t -300.107 \omega +2.426T -8918.315$	0.980
RWA40SC60	$E_{50}=1.922 \gamma_t +321.318 \omega +7.355T-11257.031$	0.969
RWA50SC50	$E_{50}=-4.783 \gamma_t -1046.986 \omega -19.988T+34552.093$	0.607
RHA5RWA5	$E_{50}=0.088 \gamma_t -37.035 \omega -0.044T+947.089$	0.987
RHA5RWA10	$E_{50}=-2.162 \gamma_t -33.497 \omega -0.090T+3845.221$	0.984
RHA10RWA5	$E_{50}=0.033 \gamma_t -61.420 \omega +0.314T+1752.99$	0.755
RHA5RWA15	$E_{50}=2.159 \gamma_t -18.434 \omega -0.222T+2327.961$	0.988
RHA10RWA10	$E_{50}=+0.450 \gamma_t +114.122 \omega +1.882T-230.707$	0.998
RHA15RWA5	$E_{50}=0.104 \gamma_t +3.395 \omega +0.412T+2530.658$	0.982
RHA5RWA20	$E_{50}=-3.129 \gamma_t +55.005 \omega +1.300T+2530.658$	0.853

ตารางที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของค่า E_{50} กับค่าสมบัติต่างๆ (วิเคราะห์แยกแต่ละอัตราส่วน) (ต่อ)

สัญลักษณ์	Regression Equation	R ²
RHA10RWA15	$E_{50} = -1.247 \gamma_t + 69.565 \omega + 1.840T - 367171$	0.916
RHA15RWA10	$E_{50} = -1.422 \gamma_t + 37.766 \omega + 0.876T + 724.828$	0.996
RHA20RWA5	$E_{50} = -0.137 \gamma_t - 23.074 \omega + 0.641T + 920.876$	0.725
RHA5RWA25	$E_{50} = 0.304 \gamma_t - 114.239 \omega - 0.604T + 2904.748$	0.957
RHA10RWA20	$E_{50} = 1.319 \gamma_t + 24.110 \omega - 0.306T - 2377.280$	0.774
RHA15RWA15	$E_{50} = -0.150 \gamma_t - 90.610 \omega - 0.217T + 2979.453$	0.964
RHA20RWA10	$E_{50} = -0.879 \gamma_t - 138.166 \omega - 0.190T + 5675.055$	0.938
RHA25RWA5	$E_{50} = -0.072 \gamma_t - 31.850 \omega - 0.103T + 1178.627$	0.884
RHA5RWA30	$E_{50} = 3.343 \gamma_t - 272.346 \omega + 0.707T + 3869.061$	0.701
RHA15RWA20	$E_{50} = -0.541 \gamma_t - 26.571 \omega + 1.060T + 1540.884$	0.926
RHA20RWA15	$E_{50} = 1.616 \gamma_t + 19.759 \omega + 2.313T - 2614.477$	0.976
RHA30RWA5	$E_{50} = -0.381 \gamma_t + 42.647 \omega + 1.665T - 1884.067$	0.999
RHA5RWA35	$E_{50} = -0.698 \gamma_t - 194.147 \omega - 0.736T + 6665.053$	0.824
RHA10RWA30	$E_{50} = 0.810 \gamma_t - 309.998 \omega - 0.015T + 10282.129$	0.761
RHA20RWA20	$E_{50} = -0.112 \gamma_t - 387.319 \omega - 2.325T + 12591.638$	0.869
RHA30RWA10	$E_{50} = -0.899 \gamma_t - 374.647 \omega - 1.826T + 14198.86$	0.727
RHA35RWA5	$E_{50} = 0.478 \gamma_t - 232.04 \omega - 2.595T + 7871.624$	0.611
RHA10RWA40	$E_{50} = -5.210 \gamma_t - 618.280 \omega + 2.855T + 25423.714$	0.949
RHA20RWA30	$E_{50} = -2.139 \gamma_t - 624.474 \omega + 0.746T + 23076.188$	0.847
RHA25RWA25	$E_{50} = 1.122 \gamma_t - 110.063 \omega - 0.460T + 2507.898$	0.862
RHA30RWA20	$E_{50} = 0.967 \gamma_t + 0.804 \omega - 0.072T - 1119.527$	1.000
RHA40RWA10	$E_{50} = -0.179 \gamma_t - 37.371 \omega + 0.255T + 1661.516$	0.717

ตารางที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของค่า ε_f กับค่าสมบัติต่างๆ (วิเคราะห์แยกแต่ละอัตราส่วน \square)

สัญลักษณ์	Regression Equation	R ²
SC	$\varepsilon_f = -0.003 \gamma_t + 0.082 \omega + 15.680$	0.632
RHA5SC95	$\varepsilon_f = 0.001 \gamma_t + 0.094 \omega - 0.002T + 9.649$	0.703
RHA10SC90	$\varepsilon_f = 0.003 \gamma_t + 1.697 \omega - 0.001T - 39.679$	0.992
RHA15SC85	$\varepsilon_f = -0.010 \gamma_t + 0.139 \omega - 0.004T + 22.952$	0.859
RHA20SC80	$\varepsilon_f = -0.027 \gamma_t + 4.138 \omega + 0.046T$	0.944
RHA25SC75	$\varepsilon_f = -3.321 \times 10^{-5} \gamma_t + 1.908 \omega + 0.009T$	0.995
RHA30SC70	$\varepsilon_f = 0.002 \gamma_t + 0.248 \omega - 0.005T + 9.196$	0.999
RHA35SC65	$\varepsilon_f = 0.002 \gamma_t + 1.568 \omega + 0.002T - 43.043$	0.904
RHA40SC60	$\varepsilon_f = 0.017 \gamma_t + 4.272 \omega + 0.009T - 159.120$	0.981
RHA50SC50	$\varepsilon_f = -0.015 \gamma_t + 1.576 \omega - 0.010T - 63.689$	0.852
RWA5SC95	$\varepsilon_f = -0.044 \gamma_t + 4.306 \omega + 0.020T - 46.805$	0.957
RWA10SC90	$\varepsilon_f = 0.001 \gamma_t + 0.761 \omega - 0.006T - 11.195$	0.999
RWA15SC85	$\varepsilon_f = 0.004 \gamma_t + 0.177 \omega - 0.007T + 11.663$	0.992
RWA20SC80	$\varepsilon_f = -0.003 \gamma_t + 0.769 \omega - 0.003T - 7.670$	0.943
RWA25SC75	$\varepsilon_f = 0.013 \gamma_t - 1.600 \omega - 0.054T + 71.424$	0.977
RWA30SC70	$\varepsilon_f = -0.005 \gamma_t - 1.593 \omega - 0.044T + 58.674$	0.917
RWA35SC65	$\varepsilon_f = -0.011 \gamma_t - 1.043 \omega - 0.061T + 50.484$	0.844
RWA40SC60	$\varepsilon_f = 0.006 \gamma_t + 5.373 \omega + 0.041T - 149.916$	0.995
RWA50SC50	$\varepsilon_f = -0.110 \gamma_t - 20.272 \omega - 0.449T + 695.904$	0.777
RHA5RWA5	$\varepsilon_f = 0.004 \gamma_t + 1.235 \omega - 0.001T - 17.895$	0.970
RHA5RWA10	$\varepsilon_f = -0.003 \gamma_t + 1.959 \omega - 0.003T - 39.864$	0.968
RHA10RWA5	$\varepsilon_f = -0.052 \gamma_t - 0.076 \omega + 0.004T - 53.625$	0.947
RHA5RWA15	$\varepsilon_f = -0.221 \gamma_t - 5.640 \omega + 0.003T + 466.433$	0.989
RHA10RWA10	$\varepsilon_f = -0.023 \gamma_t - 3.603 \omega - 0.062T + 151.036$	1.000
RHA15RWA5	$\varepsilon_f = 0.005 \gamma_t + 1.323 \omega - 0.003T - 35.271$	0.951
RHA5RWA20	$\varepsilon_f = 1.034 \gamma_t - 14.082 \omega + 0.052T - 938.031$	0.954

ตารางที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของค่า ε_f กับค่าสมบัติต่างๆ (วิเคราะห์แยกแต่ละอัตราส่วน \square ต่อ \square)

สัญลักษณ์	Regression Equation	R ²
RHA10RWA15	$\varepsilon_f = -0.111 \gamma_t + 28.338 \omega - 0.098T - 660.476$	0.936
RHA15RWA10	$\varepsilon_f = 0.015 \gamma_t - 2.379 \omega - 0.105T + 102.325$	0.987
RHA20RWA5	$\varepsilon_f = 0.004 \gamma_t + 4.259 \omega - 0.095T + 144.241$	0.898
RHA5RWA25	$\varepsilon_f = 0.021 \gamma_t + 8.736 \omega - 0.010T - 269.431$	0.999
RHA10RWA20	$\varepsilon_f = -0.024 \gamma_t + 2.067 \omega - 0.005T - 18.693$	0.961
RHA15RWA15	$\varepsilon_f = 0.028 \gamma_t + 4.200 \omega - 0.015T - 78.150$	0.811
RHA20RWA10	$\varepsilon_f = -0.061 \gamma_t - 12.068 \omega - 0.120T + 448.013$	0.982
RHA25RWA5	$\varepsilon_f = -0.001 \gamma_t - 1.820 \omega - 0.070T + 76.242$	0.999
RHA5RWA30	$\varepsilon_f = 0.073 \gamma_t + 16.741 \omega + 0.056T - 397.596$	0.714
RHA15RWA20	$\varepsilon_f = 0.037 \gamma_t + 11.917 \omega - 0.64T - 402.589$	0.966
RHA20RWA15	$\varepsilon_f = 0.178 \gamma_t + 4.362 \omega + 0.067T - 346.601$	0.995
RHA30RWA5	$\varepsilon_f = 0.039 \gamma_t + 5.952 \omega + 0.008T - 233.534$	0.941
RHA5RWA35	$\varepsilon_f = 0.071 \gamma_t + 10.271 \omega + 0.027T - 387.294$	0.940
RHA10RWA30	$\varepsilon_f = 0.001 \gamma_t + 17.650 \omega + 0.073T - 515.342$	0.999
RHA20RWA20	$\varepsilon_f = -0.047 \gamma_t + 4.846 \omega + 0.001T - 85.835$	0.851
RHA30RWA10	$\varepsilon_f = -0.018 \gamma_t - 1.146 \omega - 0.084T + 75.342$	0.959
RHA35RWA5	$\varepsilon_f = 0.013 \gamma_t + 5.269 \omega + 0.002T - 190.309$	1.000
RHA10RWA40	$\varepsilon_f = 0.261 \gamma_t + 22.871 \omega - 0.155T - 1016.439$	0.866
RHA20RWA30	$\varepsilon_f = 0.017 \gamma_t + 17.460 \omega - 0.003T - 582.061$	0.625
RHA25RWA25	$\varepsilon_f = -0.019 \gamma_t + 8.748 \omega - 0.030T - 266.863$	0.766
RHA30RWA20	$\varepsilon_f = 0.100 \gamma_t - 9.460 \omega - 0.177T + 471.460$	0.707
RHA40RWA10	$\varepsilon_f = 0.054 \gamma_t + 5.118 \omega - 0.147T + 243.763$	0.657

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

ผลจากการดำเนินการศึกษาในห้องปฏิบัติการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนสงขลาด้วยเถ้าแกลบ (RHA) และเถ้าไม้ยางพารา (RWA) สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ดินเหนียวอ่อนสงขลามีความเหมาะสมกับการปรับปรุงคุณภาพ โดยวิธีทางเคมี เนื่องจากประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลักและยังมีลักษณะเนื้อดินละเอียดซึ่งง่ายต่อการเข้าทำปฏิกิริยา ส่วนเถ้าแกลบมีองค์ประกอบทางเคมีจัดเป็นสารปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐาน ASTM C618 และเถ้าไม้ยางพารามีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ดั้งเห็นได้จากการเกิด CSH จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นได้

2) การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนสงขลาด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารามีอิทธิพลต่อค่าสภาพดัชนีพลาสติกลดลง ซึ่งส่งผลให้การบดอัดง่ายและยังมีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (γ_d) ลดลง ซึ่งจะช่วยในการลดปริมาณความชื้นในดินที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพ เนื่องจากมีการดึงไปใช้ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชัน

3) การปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าแกลบหรือเถ้าไม้ยางพาราเพียงชนิดใดชนิดหนึ่งนั้น มีอิทธิพลต่อค่ากำลังอัดเพียงเล็กน้อย เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมียังไม่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ ในขณะที่เถ้าแกลบ 20% และเถ้าไม้ยางพารา 30% เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งส่งผลให้มีค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุด ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50}) และค่าอัตราส่วนกำลังแรงเบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย (CBR) และมีอัตราการพัฒนากำลังตามอายุการบ่มอย่างชัดเจน

4) การผสมเถ้าแกลบมีอิทธิพลต่อค่าความเครียดที่จุดวิบัติสูงขึ้นตามอัตราส่วน การผสมแสดงให้เห็นว่าก่อนดินตัวอย่างมีความเหนียวเพิ่มขึ้น ในขณะที่การผสมเถ้าไม้ยางพารามีอิทธิพลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50}) สูงขึ้นตามอัตราส่วนการผสมแสดงให้เห็นว่าก่อนดินอย่างมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้กำลังของดินมากขึ้น

5) การปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าแกลบ 20% และเถ้าไม้ยางพารา 30% มีอิทธิพลต่อค่าอัตรากำลังเบกทานแคลิฟอร์เนีย (\square BR) สูงขึ้นอย่างชัดเจนประมาณ 51% 291% 505.5 1058 และ 1282.5% ที่อายุบ่ม 1 7 14 28 และ 56 วัน ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) การศึกษาวิจัยดินเหนียวอ่อนสงขลา ก่อนและหลังผสมด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราเป็นการดำเนินการศึกษาวิจัยในระดับในห้องปฏิบัติการทดสอบเท่านั้น เพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการพิจารณาเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน ซึ่งหากนำไปใช้งานจริงจะต้องพิจารณาถึงวิธีการดำเนินงาน การบดอัด สภาพหน้างาน ซึ่งอาจจะต้องสร้างแปลงทดลองในสนามจริง เพื่อทำการศึกษา โดยอาศัยข้อมูลการทำงานจริงในสนามเป็นตัวเปรียบเทียบกับการศึกษาในห้องปฏิบัติการทดสอบ แล้วหาค่าปรับแก้เพื่อให้ค่าในห้องปฏิบัติการทดสอบสอดคล้องกับค่างานจริงในสนาม

2) กำลังอัดของการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนสงขลาด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา ควรนำมาบดละเอียดมากกว่า 325 เมชหรือ 45 ไมครอน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชันของวัสดุปอซโซลานให้ดียิ่งขึ้น

3) ควรเลือกแหล่งเถ้าที่มีการเผาแบบระบบปิดทำให้กระบวนการเผาไหม้สมบูรณ์ได้เถ้ามีปริมาณของสารอินทรีย์ที่หลงเหลืออยู่น้อยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ให้ดียิ่งขึ้น

4) ควรมีการศึกษาตัวอย่างทดสอบแบบแช่น้ำ เพื่อให้ได้ข้อมูลการทดสอบ $U \square S$ และ \square BR ทั้งแบบไม่แช่น้ำและแช่น้ำ เพื่อนำมาเป็นประโยชน์เกี่ยวกับงานทางด้านวิศวกรรมทาง

บรรณานุกรม

- กรมทรัพยากรธรณี. (2544). ธรณีวิทยาประเทศไทย. กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี. กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร.
- เกษม เพชรเกิดและโกศล ไกรพัฒนพงศ์. (2544). การศึกษาผลกระทบของโซเดียมคลอไรด์ สารอินทรีย์และค่าความเป็นกรดต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯผสมซีเมนต์แบบเปียก. การสัมมนาวิศวกรรมการทาง ครั้งที่ 1. 16-17 กรกฎาคม 2544. โรงแรมมิราเคิลแกรนด์คอนเวนชั่น. กรุงเทพมหานคร.
- ชาคริต แดงขาวเขียว, ฐาปนวิสัน รอดศัตรูและอัครเดช เล็กเลิศสุนทร. (2542). การปรับปรุงคุณสมบัติมวลละเอียดโดยใช้เถ้าลอยแม่เมาะ. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เชาวนีย์ ชิวชูเกียรติ. (2544). การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยซีเมนต์และเถ้าแกลบ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุลและไกรวุฒิ เกียรติโกมล. (2549). การศึกษาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์ม น้ำมันในงานคอนกรีต. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร.
- دنول ดันนโยภาสและจิราชาติ เจ้าสินเจริญ. (2543). ปูนผสมเถ้าลอยและเถ้าชี้เลี้ยงไม้ยางพารา. วารสารสงขลานครินทร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. หน้า 489-500.
- دنول ดันนโยภาสและธนภัทร์ พุดบุรี. (2551). มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เต็มฝุ่นเหมืองหินผสมเถ้าเชื้อเพลิงไฮปาล์มน้ำมันบดหล่อด้วยน้ำเนื้อหมาสด. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 28-29 มกราคม 2551. หน้า 19-24.
- ดิษฐพร แก้วมณีโชติ. (2551). การปรับปรุงสมบัติของดินเหนียวปากพั้งด้วยเถ้าไฮปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ทรงพล บุญมาดี. (2529). ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength and Unsoaked CBR ของดินลูกรังผสมซีเมนต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร. หน้า 100-128.

- ชนิด เกลิมยานนท์ พิพัฒน์ ทองฉิม สุชาติ ลี้มกต์ญญู กวีล จันทรพัลและซารฟานโตะมีนา. (2548). คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวบดอัดเสริมกำลังด้วยขยะพลาสติก. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ครั้งที่ 4. 8-9 ธันวาคม 2548. หน้า 78-82.
- ปริญญา จินดาประเสริฐและชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). Cement Pozzolan and Concrete. บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด. กรุงเทพมหานคร.
- วิจิตรอัจฉรา สรรพกิจจางง, ธนศักดิ์ ใฝ่กระทกและบุญเลิศ พัดฉวี. (2536). เถ้าลอยในงานทาง. รายงานฉบับที่ วพ. 131. ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง.
- สุขสันต์ หอพิบูลสุขและรุ่งลาวัลย์ ราชัน. (2550). ปฏิพิภคศาสตร์. สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล. กรุงเทพมหานคร. หน้า 22-25.
- สมชัย กกก้าแหง. (2536). การนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ในงานก่อสร้างของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. การประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรมประจำปี 2536. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร.
- สมมาตร สวัสดิ์. (2550). การปรับปรุงดินกันทางด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในจังหวัดสงขลาและสตูล. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ศุภกิจ นนทนานันท์. (2537). การปรับปรุงคุณภาพดิน. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร.
- ศุภกิจ นนทนานันท์และกมล อมรฟ้า. (2545). การปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนโดยใช้ซีเมนต์และปูนขาว. การประชุมวิศวกรรมโยธา ครั้งที่ 8. 23-25 ตุลาคม 2545. โรงแรมโซฟิเทล ราชอาอคิด. จังหวัดขอนแก่น.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2551). ฝ่ายวิชาการการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กรุงเทพมหานคร
- สันชัย อินทพิชัยและพานิช วุฒิพฤษ. (2547) ปฏิพิภคศาสตร์. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- อภิชัย จุฑาศิริวงศ์. (2546). สภาพทางธรณีและลักษณะของชั้นดินในบริเวณภาคใต้. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อภิสิทธิ์ กล้าเหม็ง. (2547). พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดี่ยวของหินแกรนิตที่ปรับเสถียรภาพด้วยเถ้าลอยผสมซีเมนต์สำหรับวัสดุก่อสร้างทาง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

- ASTM, C 618-98. (1998). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Concrete.
- ASTM, D 421-85. (1989). Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size. Analysis and Determination of Soil Constants.
- ASTM, D 698. (1989). Laboratory Compaction Characteristics of Soil. Using Standard Effort (12400 ft-lbf/ft³. (600 kN-m/m³))³
- ASTM, D 698-00a. (1989). Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil. Using Standard Effort (12400 ft-lbf/ft³ [600 kN-m/m³]).
- ASTM, D 854-02. (1989). Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.
- ASTM, D 1883. (1989). Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils.
- ASTM, D 2166. (1989). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. (D. 2166-00).
- ASTM, D 2216. (1989). Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.
- ASTM, D 2435. (1996). Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils.
- ASTM, D 4318. (1989). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- ASTM, D 2435-96. (1996). Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils.
- Anon, (1990). State of Art Report on Soil-Cement. American Concrete Institute Materials Journal. Vol. 87, pp. 395-417.
- Awal, Abdul A.S.M. (1979). Effect of Portland Cement Mixing on Soil Properties. Master of Engineering Thesis, Geotechnical Engineering Program. Asian Institute of Technology. 32p.
- Baker, C.N. (1955). Strength of Soil-Cement as a Function of Mixing. Highway Research Board Bull. 98. National Research Council. Washington, D.C. U.S.A.

- Basha, E.A. Hashim, R. Mahmud, H.A. and Muntohar, S.A. (2003). Effect of the Cement-Rice Husk Ash on the Plasticity and Compaction of Soil. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 8,
- Basha, E.A. Hashim, R. Mahmud, H.A. and Muntohar, S.A. (2005). Stabilization of Residual Soil with Rice Husk Ash and Cement. Construction and Building Material. Vol.19. No.6, p. 448-453.
- Catton, M.D. (1938). Soil-Cement Mixtures for Roads. Highway Research Board Proceeding. Vol. 18., Part II. pp. 314-321.
- Chaimanee, N. (1986). The transgression-regression event in Songkhla Lake Basin. Southern Thailand : Proceeding of CCOP Symposium, CCOP Technical Secretariat, Bangkok pp. 169 – 178.
- Chen, L. and Lin, D.F. (2009). Stabilization Treatment of Soft Subgrade Soil by Sewage Sludge Ash and Cement. Journal of Hazardous Materials. Vol. 162, No.1., pp. 321-327.
- Clare, K.E. and Pollard, A.E. (1951). The Relationship between Compressive Strength and Age for Soil Stabilization with Four Types of Cement. Magazine of Concrete Research. Vol. 3, No. 98., pp. 57-67.
- Cox, J.B. (1970). A Review of the Engineering Characteristics of the Recent Marine Clays in South East Asia. Asian Institute of Technology. Bangkok. Thailand.
- Corps of Engineering, (1956). Summary Review of Soil Stabilization Processes. Report No. 3. Soil-Cement. Miscellaneans. Waterways Experiment Station. 33 p.
- Davidson, D.T. Katti, R.K. and Welch, D.E. (1958). Use of Fly ash with Portland Cement for Stabilization of Soil. Highway Research Board. Bulletin. Vol. 189, pp. 1-11.
- Davidson, D.T. (1961). Soil Stabilization with Portland Cement. Highway Research Board Bull. 292. National Research Council. Washington. D.C. U.S.A.
- Davidson, D.T. Pitre, G.L. Matoes, M. and Kalankamary, P.G. (1962). Moisture-Density, Moisture-Strength and Compaction Characteristics of Cement Treated Soil Mixtures. Highway Research Board. Bulletin. Vol.353, pp. 42-63.
- Diamond, S. and Kinter, E.B. (1958). A Rapid Method of Predicting the Portland Cement Requirement for Stabilization of Plastic Soil. Highway Research Board Bull. Vol. 198, National Research Council. Washington. D.C. U.S.A. pp. 32-43.

- Felt, E.J. (1955). Factors Influencing Physical Properties of Soil-Cement Mixtures. Highway Research Board. Bulletin. Vol. 108, pp. 138-163.
- Fuller, M.G. and Dabney, G.W. (1952). Stabilizing Weak and Defective Bases with Hydrate Lime. Roads and Streets. Vol. 95, pp. 64-69.
- Goktepe, A.B., Sezer, A., Sezer, G.I. and Ramyar, K. (2008). Classification of Time-Dependent Unconfined Strength of Fly Ash Treated Clay. Construction and Building Materials. Vol. 22, No.4, pp. 675-683.
- Gurtug, Y. and Sridharan, A, (2002). Prediction of Compaction Characteristics of Fine-Grained Soils. Geotechnique, Vol. 52, No.10, pp. 761-763.
- Hausmann, M.R. (1990). Engineering Principles of Ground Modification. Sydney. 632 p.
- Herzog, A. and Mitchell, J.K. (1963). Reactions Accompanying Stabilization of Clay with Cement. Highway Research Record. No. 36, pp. 146-171.
- Hicks, L.D. (1942). Soil-Cement Design in North Carolina. Highway Research Board. Proceed No. 22, pp. 415-418.
- Highway Research Board, (1949). Prevention of Moisture Loss in Soil-Cement with Bituminous Material. Highway Research Board Report 8-F. National Research Council. Washington. D.C. U.S.A.
- Highway Research Board Committee on Soil-Cement Stabilization, (1959). Definition of Term Relating to Soil-Portland Cement Stabilization. Highway Research Abstracts. Vol. 29, No. 6, pp. 28-129.
- Horpibulsuk, S. (2005). Analysis and assessment of compaction curve. Ground Improvement. (Under review). Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 131, No.2,
- Ingles, O.G. (1970). Mechanism of Clay Stabilization with Inorganic Acids and Alkalis. Butterworth. Sydney. Australia. 374p.
- Ingles, O.G. and Metcalf, J.B. (1972). Soil Stabilization Principles and Practice. Butterworth, Sydney, Australia. 374 p.
- 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, No. 2, pp. 301-313.

- Lambe, T.W. and Witman, R.V. (1979). Soil Mechanics. John Wiley & Sons. New York.
- Lambe, T.W. (1962). Soil Stabilization. Chapter 4 of Foundation Engineering. G.A. Leonard (ed.), Mc.Graw Hill, New York.
- Lambe, T.W., Mitcheals, A.S. and Moh, Z.C. (1959). Improvements of Soil Cement with Alkali Metal Compounds. Highway Research Board. Bulletin 241. pp. 67-103.
- Leadabrand, J.A. (1956). Some Engineering Aspects of Soil-Cement Mixtures. Mid-South Section ASCE. Vol. 3., pp. 127-153.
- Lee, P.Y. and Suedkamp, R.J. (1972). Characteristics of Irregularly Shaped Compaction Curves of Soils. Highway Research Record No. 381, National Academic of Sciences. Washington D.C., pp. 1-9.
- Lee, F.H. Lee, Y. Chew, S.H. and Yong, K.Y. (2005). Strength and Modulus of Marine Clay-Cement Mixes. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 131 No. 2, pp. 178 -186.
- Lin, D-F. Lin, K-L. Hung, M-J. and Luo, H.L. (2007). Sludge Ash/Hydrated Lime on the Geotechnical Properties of Soft Soil. Journal of Hazardous Materials. Vol. 145, No. 1-2, pp. 58-64.
- Lovering, W.R. (1951). Uniformity of Class C Cement Treated Base Subject of Tests. California Highways and Public Works. pp. 43-45.
- Maclean, D.J., Robinson, P.J.M. and Webb, S.B. (1952). An Investigation of the Stabilization of a Heavy Clay Soil with Cement for Road Base Construction. Roads and Road Construction. Vol. 3, No. 358, pp. 287-292.
- Maner, A.W. (1952). Curing Soil-Cement Base. Highway Research Record Proceeding. Vol. 31., pp. 540-558.
- Marshall, T.J. (1954). Some Properties of Soil Treated with Portland Cement. Symposium on Soil Stabilization. Australia. pp. 28-34.
- Metcalf, J.B. (1977). Principle and Application of Cement and Lime Stabilization. Australian Road Research Board. No. 49. 20 p.
- Mill, W.J. (1935). Road Base Stabilization with Portland Cement. Engineering News-Record. Vol. 115, No. 22, pp. 751-753.

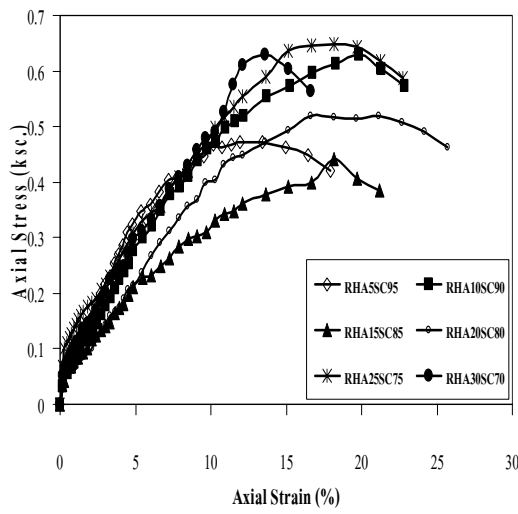
- Minnick, L.J., Webster, W.C. and Prudy, E.J. (1970). Prediction of Fly Ash Performance. Proc. Fly Ash Utilization Conference, Bureau of Mines Information Circular 8488.
- Mitchell, J.K. and El Jack, S.A. (1966). The Fabric of Soil-Cement and Its Formation. Proceedings of 14th National Conference Clay and Clay Minerals. Vol. 26., pp. 297-305.
- Mitchell, J.K. (1976). The Properties of Cement-Stabilized Soils. Sydney. 632 p.
- Moh, Z.C. (1962). Soil Stabilization with Cement and Sodium Additive. Journal of SMFD. Vol. 88., No. SM.6. pp.81-105.
- Misra, A., Biswas, D. and Upadhyaya, S. (2005). Physico-Mechanical Behavior of Self-Cementing Class C Fly Ash-Caly Mixtures. Fuel. Vol. 84, No. 11, pp. 1410-1422.
- Murty, V.R. and Praveen, G.V. (2008). Use of Chemically Stabilized Soil as Cushion Master below Light Weight Structures Founded on Expansive Soil. Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 20, No. 5, pp. 178-186.
- Nair, D.G., Jagadish, K.S. and Fraaij, A. (2006). Reactive Pozzolanas from Rice Husk Ash: An Alternative to Cement for Rural Housing. Cement and Concrete Research. Vol. 36, No. 6, pp. 1062-1071.
- Nagaraj, T.S., Pandian, N.S. and Narasimha Raju, P.S.R. (1994). Stress State Permeability Relationship for Overconsolidation Clays. Geotechnique. Vol. 44, No. 2. pp. 349-352.
- Norling, L.T. and Packard, R.G. (1958). Expanded Short-Cut Test Method for Determining Cement Factors for Sandy Soils. Highway Research Record. Bulletin. Vol. 198, pp. 20-31.
- Pendola, H.J., Kennady, T.W. and Hudson, W.R. (1969). Evaluation of Factors Affecing the Tensile Properties of Cement-Treated Materials. University of Texas at Austin Research Report. Vol. 98, No. 3, 93 p.
- Portland Cement Association, (1956). Summaries of Soil-Cement Construction. Yearly Supplement. SC-104-1956 Supplement. pp. 1-7.
- Portland Cement Association, (1959). Soil-Cement Laboratory Handbook. Illinois. Skokie. 60p.
- Prabakar, J. Dendorkar, N. and Morchhale, R.K. (2004). Influence of fly on strength behavior of typical soils. Construction and Building Materials. Vol. 18, pp. 263-267.

- Reinhold, F. (1955). Elastic Behavior of Soil-Cement Mixtures. Highway Research Record. Bulletin. Vol. 108, pp. 128-137.
- Redus, J.F. (1958). Study of Soil-Cement Base Courses on Military Airfields. Highway Research Board. Bulletin. Vol. 198, pp. 13-18.
- Ruenkrairergsa, T. (1982). Principle of Soil Stabilization. Department of Highways. Bangkok. Thailand. 132 p.
- Sariosseiri, F. and Muhuthan, B. (2009). Effect of Cement on Geotechnical Properties of Some Washington State Soils. Engineering Geology. Vol. 104, No. 1-2 pp. 119-125.
- Saitoh, S., Suzuki, Y., Shirai, K., (1985). Hardening of Soil Improved by Deep Mixing Method. Proc. 11th Int. Conf. SM FE 1985 pp. 1745-1748.
- Sharma, R.S. Phanikumar, B.R and Rao, B.V. (2008). Engineering Behavior of a Remolded Expansive Clay Blended with Lime, Calcium Chloride, and Rice-Husk Ash. Journal of Materials in Civil Engineering. No. 20, No. 8, pp. 509-515.
- Terrel, R.L., Barenberg, E.J., Mitchell, J.M. and Thomson, M.R. (1979). Soil Stabilization in Pavement Structure A User's Manual Mixture Design Consideration. Vol. 2, Washington. D.C. Government Printing Office. 120 p.
- United States Air Force, (1966). Manual AFM 88-51 Materials Testing. Department of the Air Force. New York. 185p.
- Weiping, M. and Brown, P.W. (1997). Hydrothermal Reaction of Fly Ash with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Cement and Concrete Research Vol. 27, No. 8, pp. 1237-1248.
- Yang, Y.C., Shaaban, M.G. and Mahmud, H.B. (2006). Stabilization/Solidification of Lead-Contaminated Soil using Cement and Rice Husk Ash. Journal of Hazardous Materials. Vol. 137, Issue. 3, pp. 1758-1764.

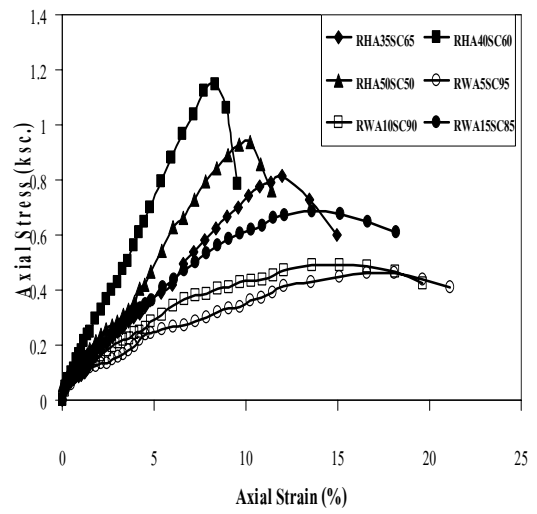
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

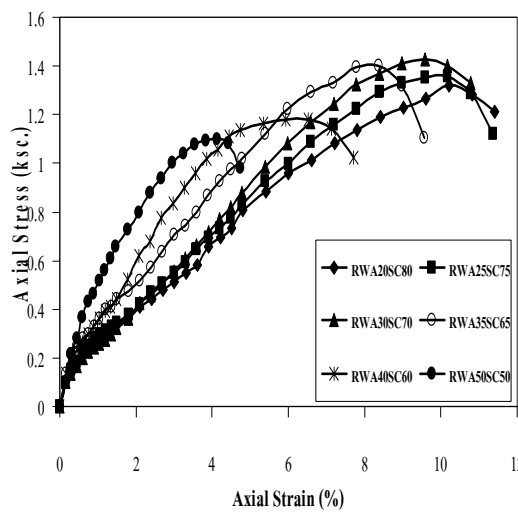
พฤติกรรมกำลังอัดของดินเหนียวอ่อนสองลาก่อนและหลังจากปรับปรุงด้วย
เสาเกลบและเสาไม้อย่างพาราที่อายุการบ่มต่างๆ



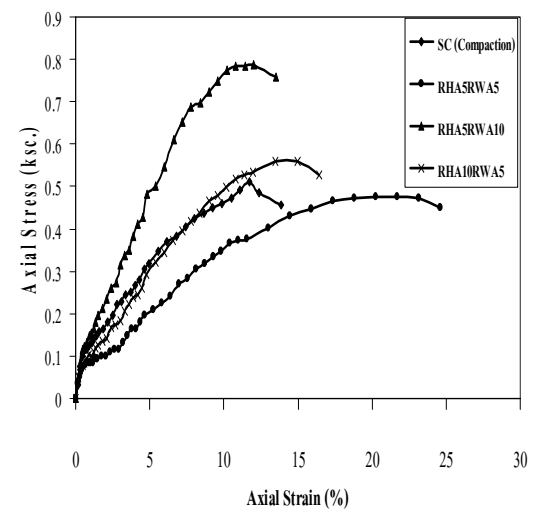
ก)



ข)

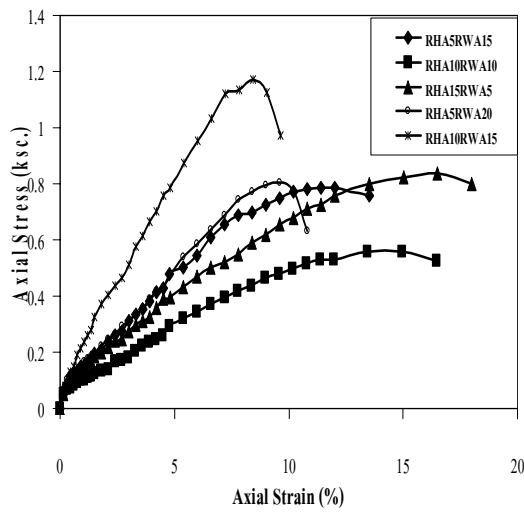


ค)

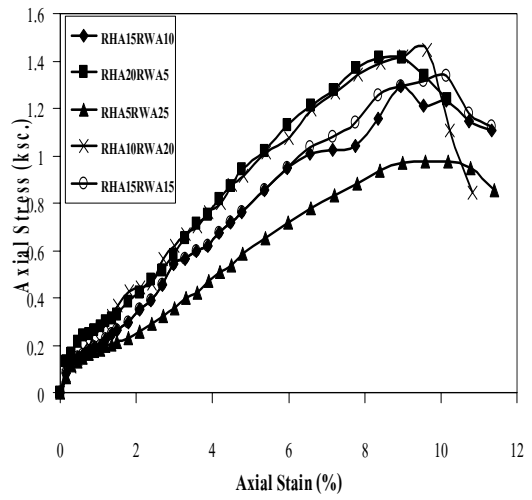


ง)

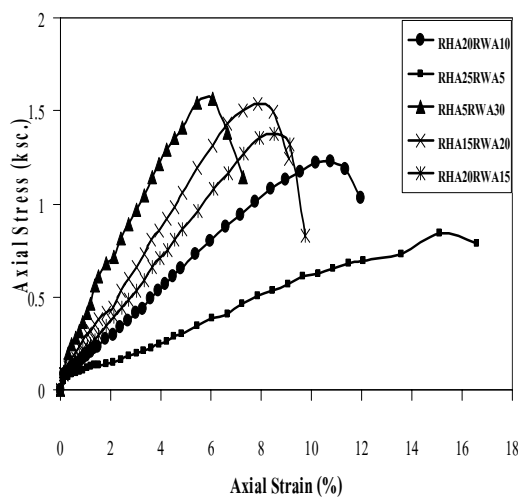
รูปที่ ก-1 พฤติกรรมกำลังอัดของดินที่ปรับปรุงที่ไม่บ่ม ก) RHA5SC95-RHA30SC70 ข) RHA35SC65-RWA15SC85 ค) RHA20SC80-RWA50SC50 ง) SC (Compaction)-RHA10RWA5



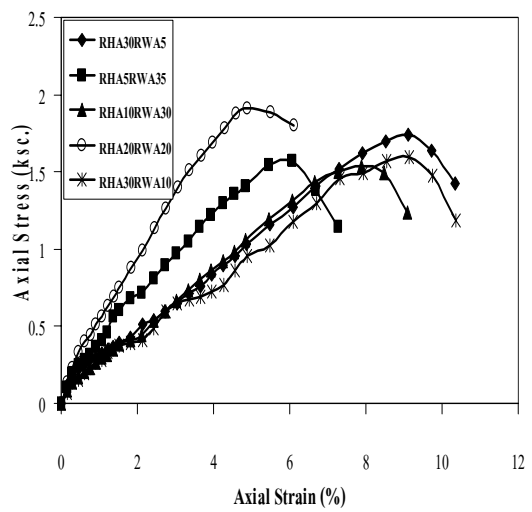
ก)



ข)

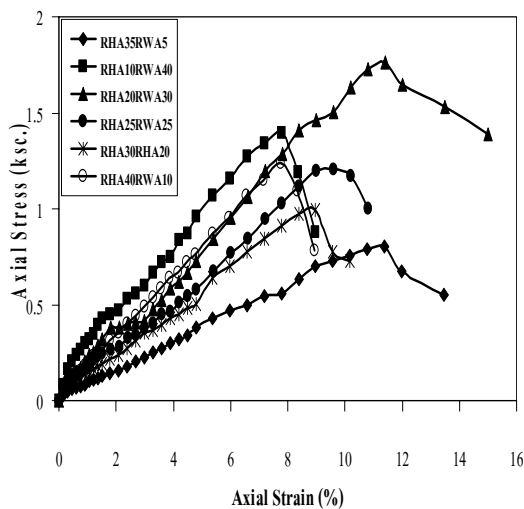


ค)

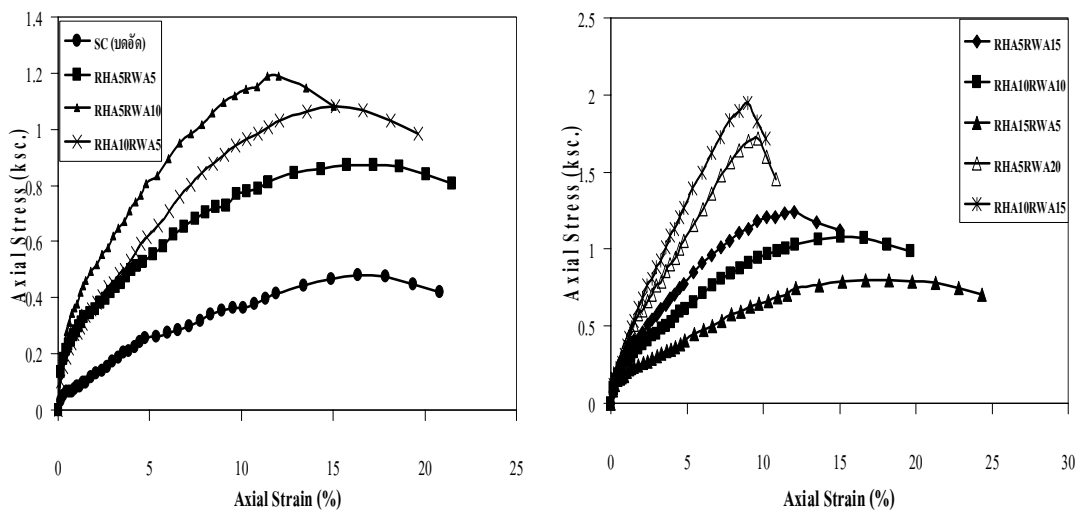


ง)

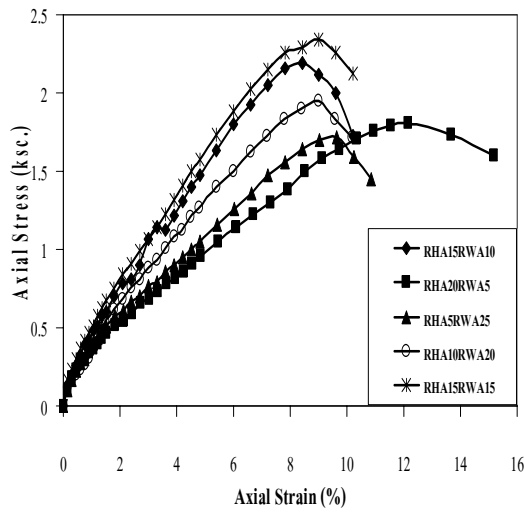
รูปที่ ก-2 พฤติกรรมกำลังอัดของดินที่ปรับปรุงที่ไม่บ่ม ก) RHA5RWA15-RHA10RWA15 ข) RHA30RAW5-RHA15RWA15 ค) RHA20RWA10-RHA20SRWA15 ง) RHA30RWA5-RHA30RWA10



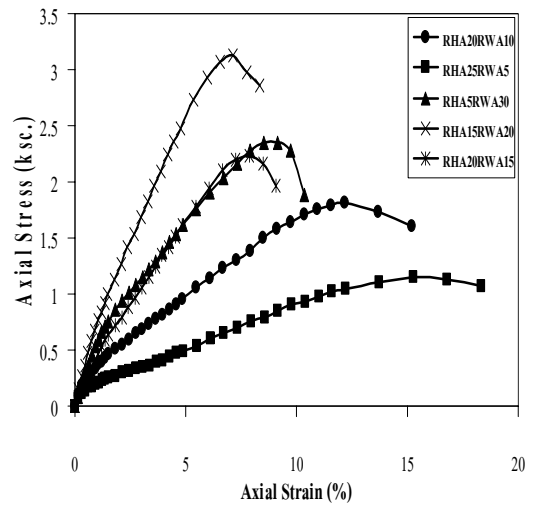
รูปที่ ก-3 พฤติกรรมกำลังอัดของดินที่ปรับปรุงที่ไม่บ่ม ก) RHA35RWA5-RHA40RWA10



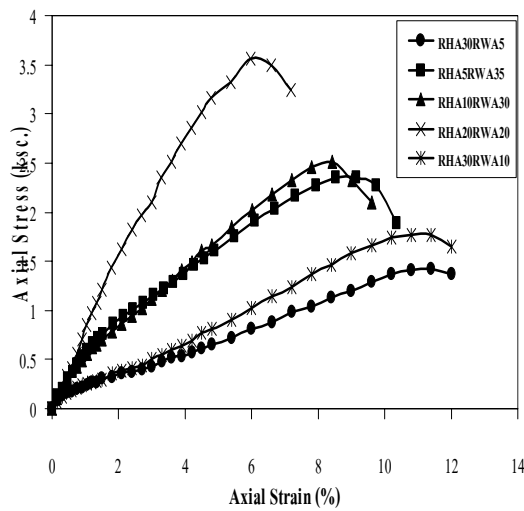
รูปที่ ก-4 พฤติกรรมกำลังอัดของดินที่ปรับปรุงที่อายุบ่ม 7 วัน ก) SC(Compaction)-RHA10RWA5
ข) RHA5RAW15-RHA10RWA15



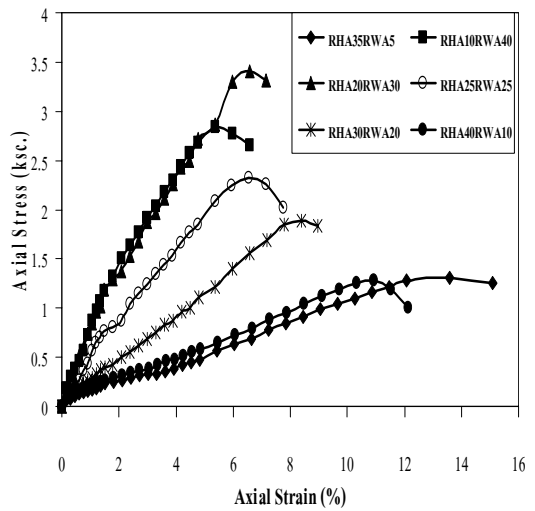
ก)



ข)

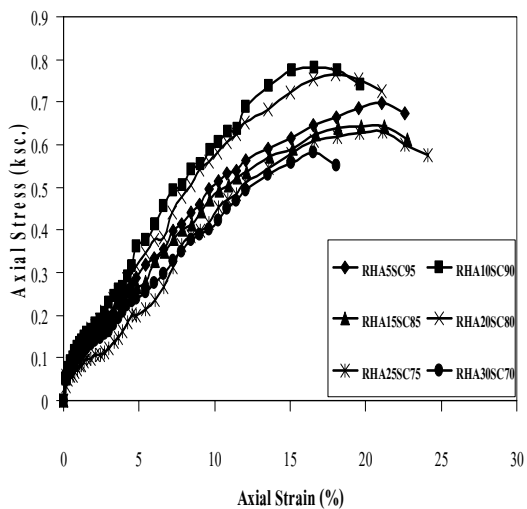


ค)

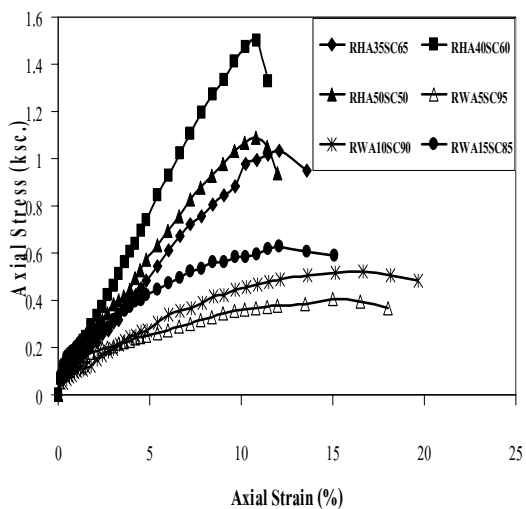


ง)

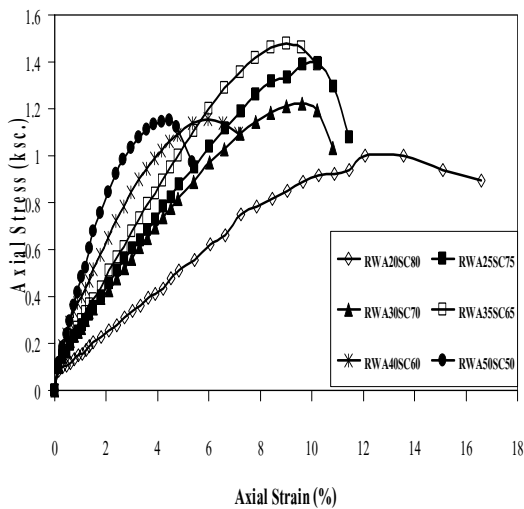
รูปที่ ก-5 พฤติกรรมกำลังอัดของดินที่ปรับปรุงที่อายุบ่ม 7 วัน ก) RHA15RWA10-
RHA15RWA15 ข) RHA20RAW10-RHA20RWA15 ค) RHA30RWA5-
RHA30SRWA10 ง) RHA35RWA5-RHA40RWA10



ก)

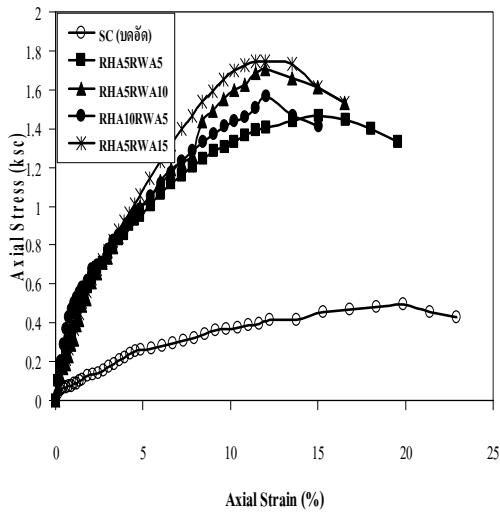


ข)

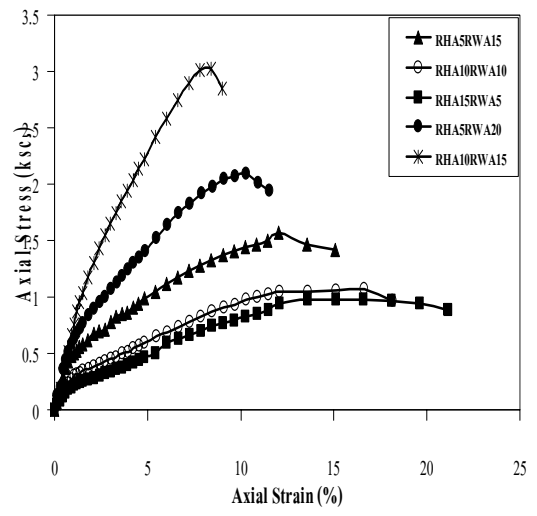


ค)

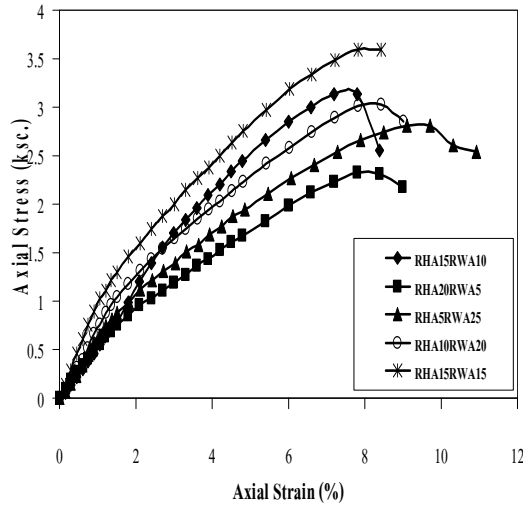
รูปที่ 6 พฤติกรรมกำลังอัดของดินที่ปรับปรุงที่อายุบ่ม 7 วัน ก) RHA5SC95-RHA30SC70
 ข) RHA35SC65-RWA15SC85 ค) RWA20SC80-RWA50SC50



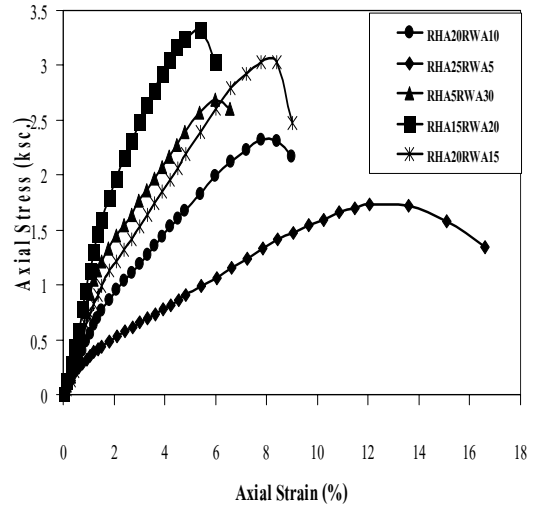
ก)



ข)

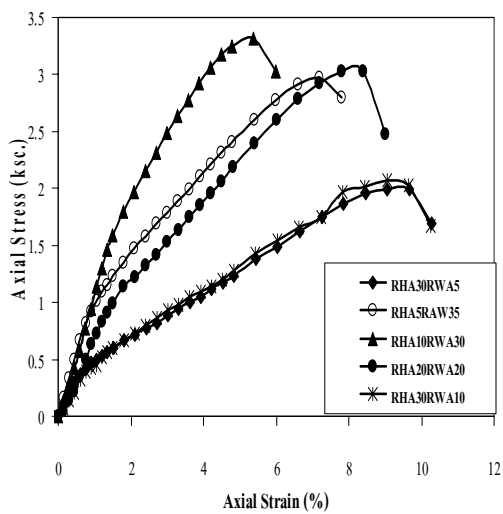


ค)

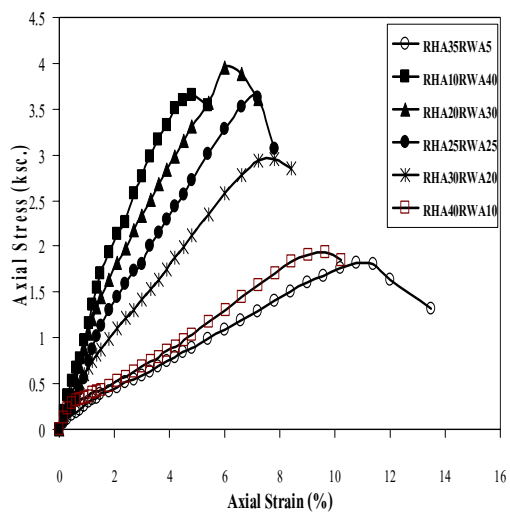


ง)

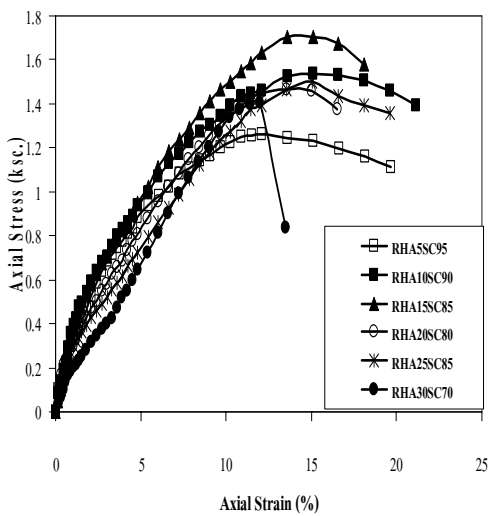
รูปที่ ก-7 พฤติกรรมกำลังอัดของดินที่ปรับปรุงที่อายุป่ม 14 วัน ก) SC (Compaction)-RHA10RWA5 ข) RHA5RAW15-RHA10RWA15 ค) RHA15RWA10-RHA15RWA15 ง) RHA20RWA10-RHA20RWA15



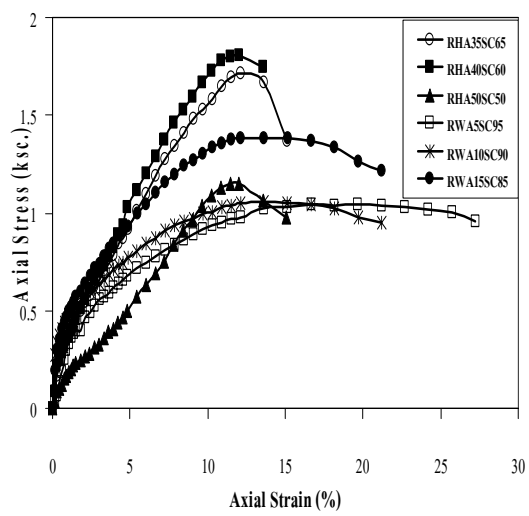
ก)



ข)

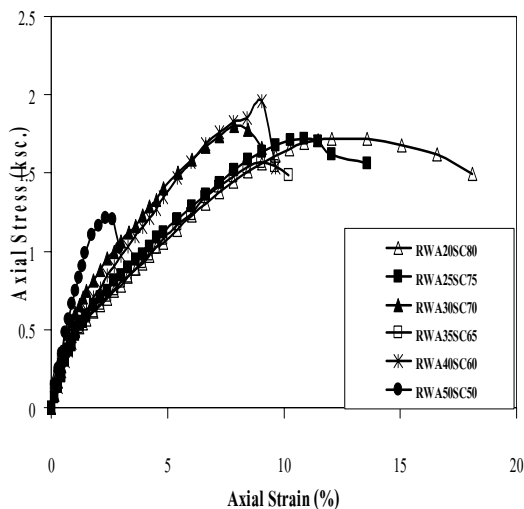


ค)



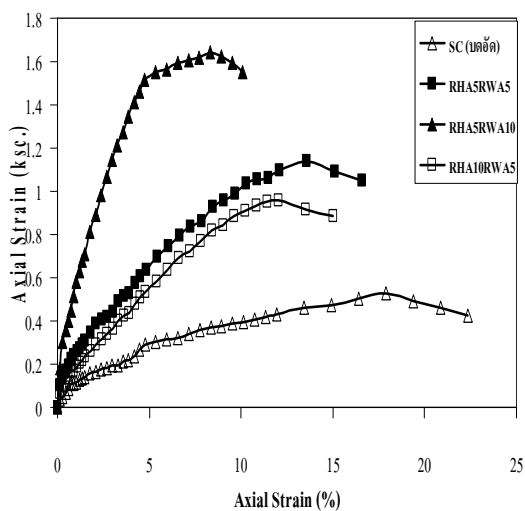
ง)

รูปที่ 8 พฤติกรรมกำลังอัดของดินที่ปรับปรุงที่อายุบ่ม 14 วัน ก) RHA30RWA5- RHA30RWA10 ข) RHA35RAW5-RHA40RWA10 ค) RHA5SC95-RHA30SC70 ง) RHA35SC65-RWA15SC85

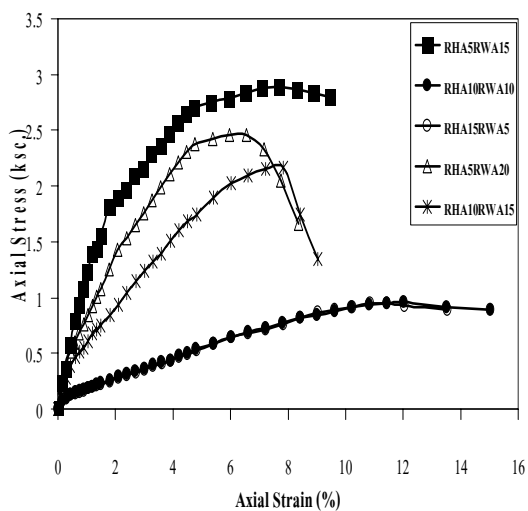


ก)

รูปที่ ก-9 พฤติกรรมกำลังอัดของดินที่ปรับปรุงที่อายุบ่ม 14 วัน ก) RWA20SC80-RWA50SC50

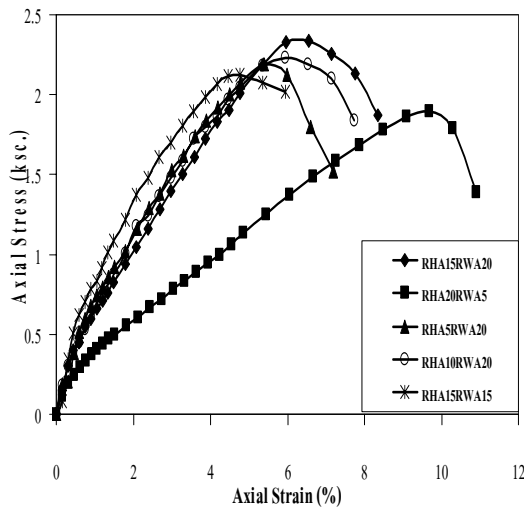


ก)

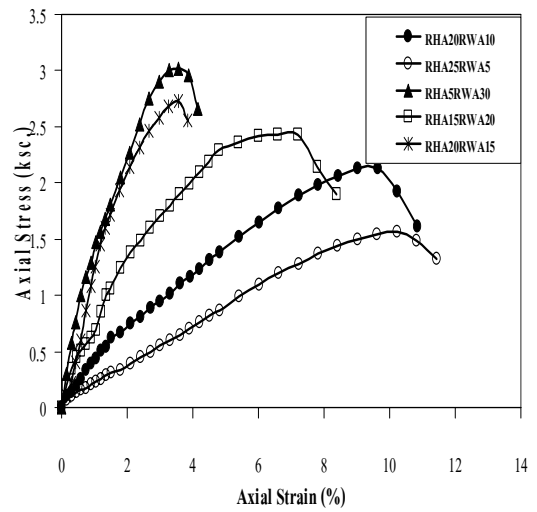


ข)

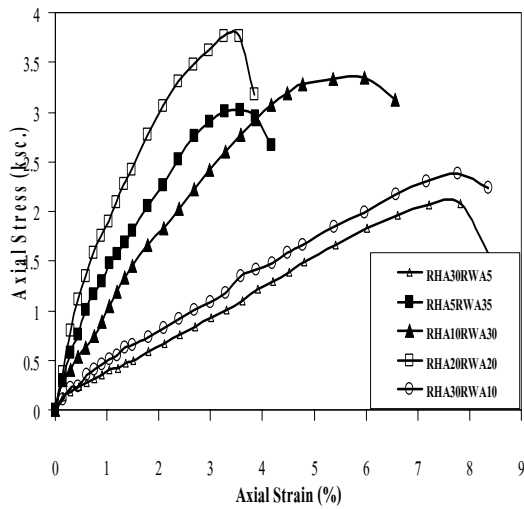
รูปที่ ก-10 พฤติกรรมกำลังอัดของดินที่ปรับปรุงที่อายุบ่ม 28 วัน ก) SC (Compaction)-RHA10RWA5 ข) RHA5RAW15-RHA10RWA15



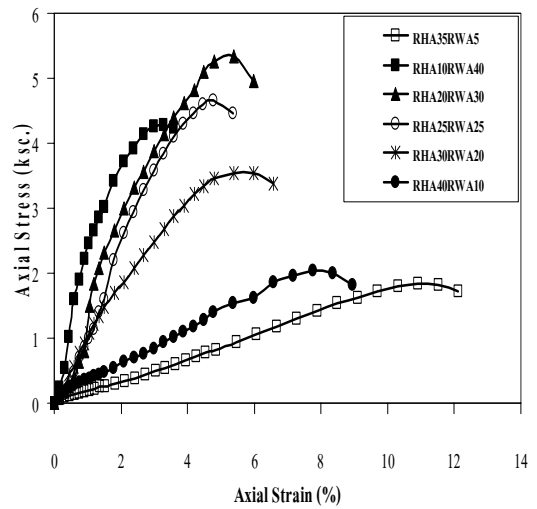
ก)



ข)

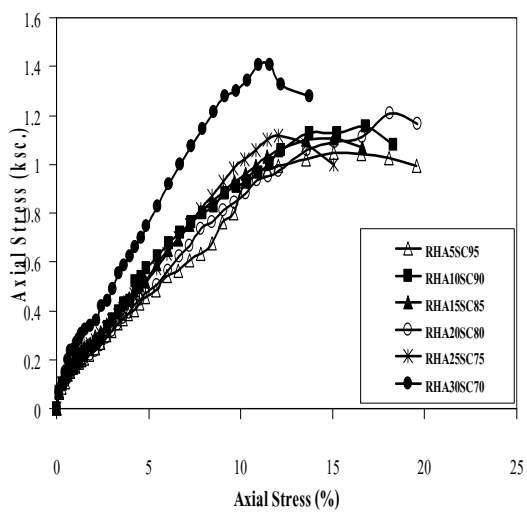


ค)

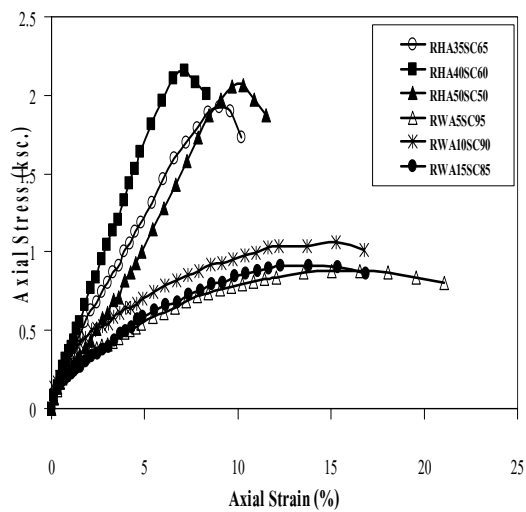


ง)

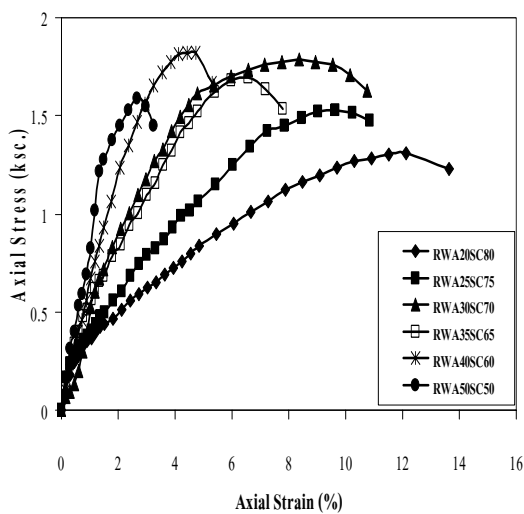
รูปที่ ก-11 พฤติกรรมกำลังอัดของดินที่ปรับปรุงที่อายุบ่ม 28 วัน ก) RHA15RWA10-RHA15RWA15 ข) RHA20RWA10-RHA20RWA15 ค) RHA30RWA5-RHA30RWA10 ง) RHA35RAW5-RHA40RWA10



ก)

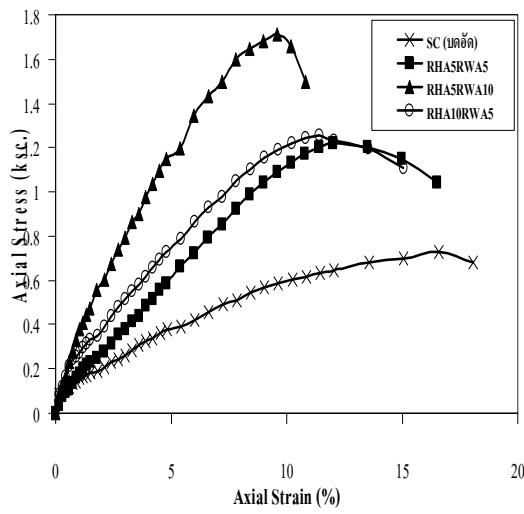


ข)

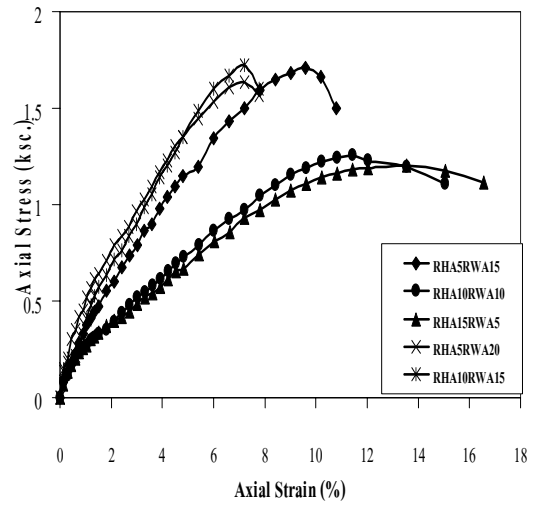


จ)

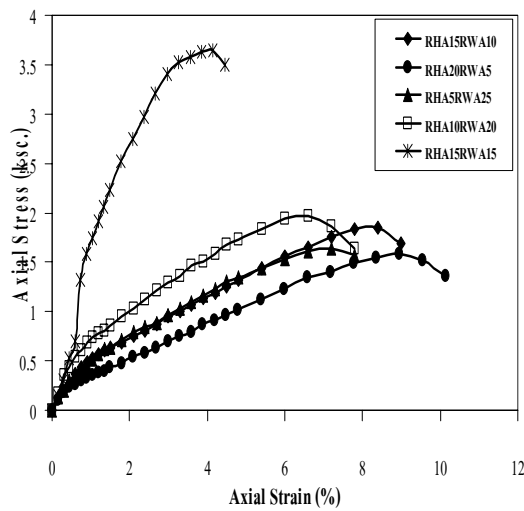
รูปที่ ก-12 พฤติกรรมกำลังอัดของดินที่ปรับปรุงที่อายุบ่ม 28 วัน ก) RHA5SC95-RHA30SC70
 ข) RHA35SC65-RWA15SC85 จ) RWA20SC80-RWA50SC50



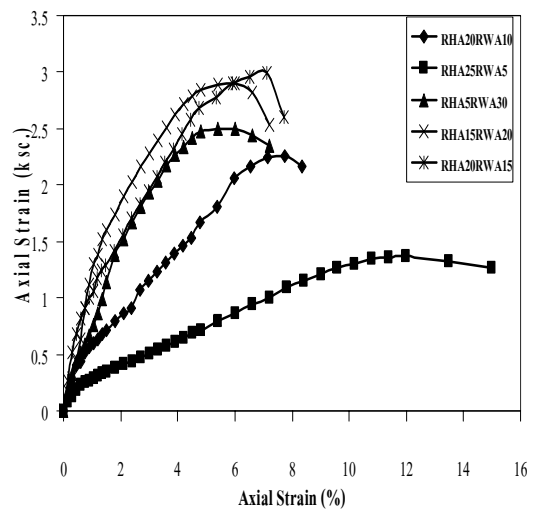
ก)



ข)

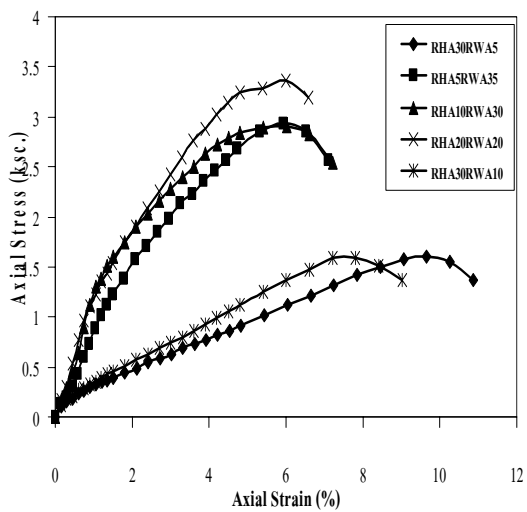


ค)

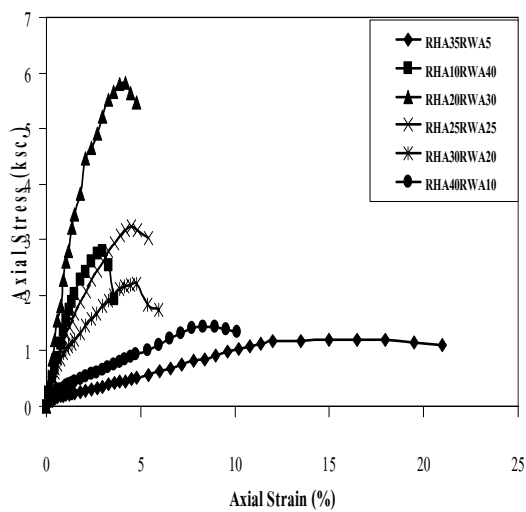


ง)

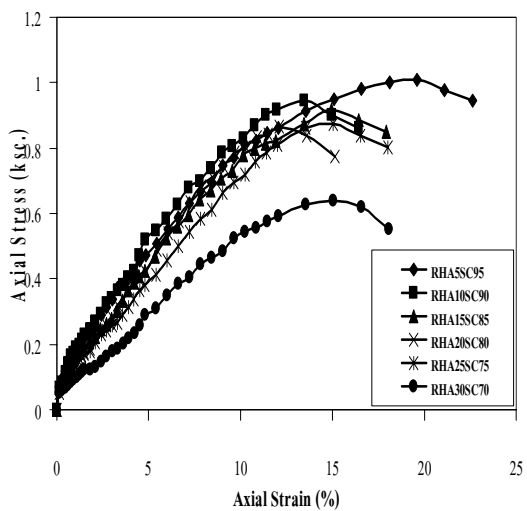
รูปที่ ก-13 พฤติกรรมกำลังอัดของดินที่ปรับปรุงที่อายุบ่ม 56 วัน ก) SC (Compaction)-RHA10RWA5 ข) RHA5RAW15-RHA10RWA15 ค) RHA15RWA10-RHA15RWA15 ง) RHA20RWA10-RHA20RWA15



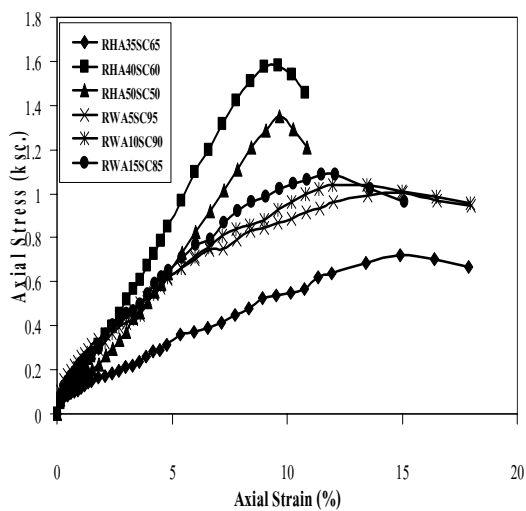
ก)



ข)

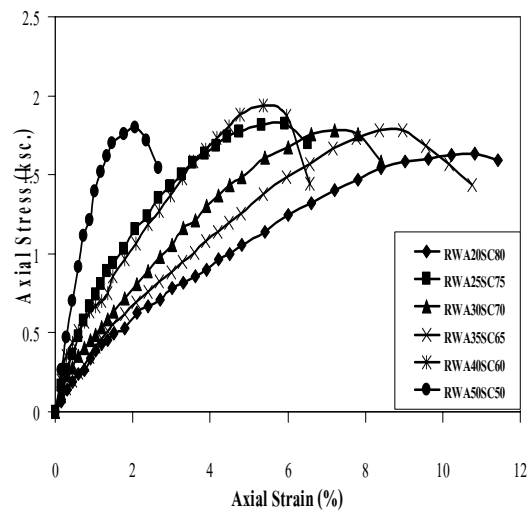


ค)



ง)

รูปที่ ก-14 พฤติกรรมกำลังอัดของดินที่ปรับปรุงที่อายุบ่ม 56 วัน ก) RHA30RWA5-RHA30RWA10 ข) RHA35RAW5-RHA40RWA10 ค) RHA5SC95-RHA30SC70 ง) RHA35SC65-RWA15SC85

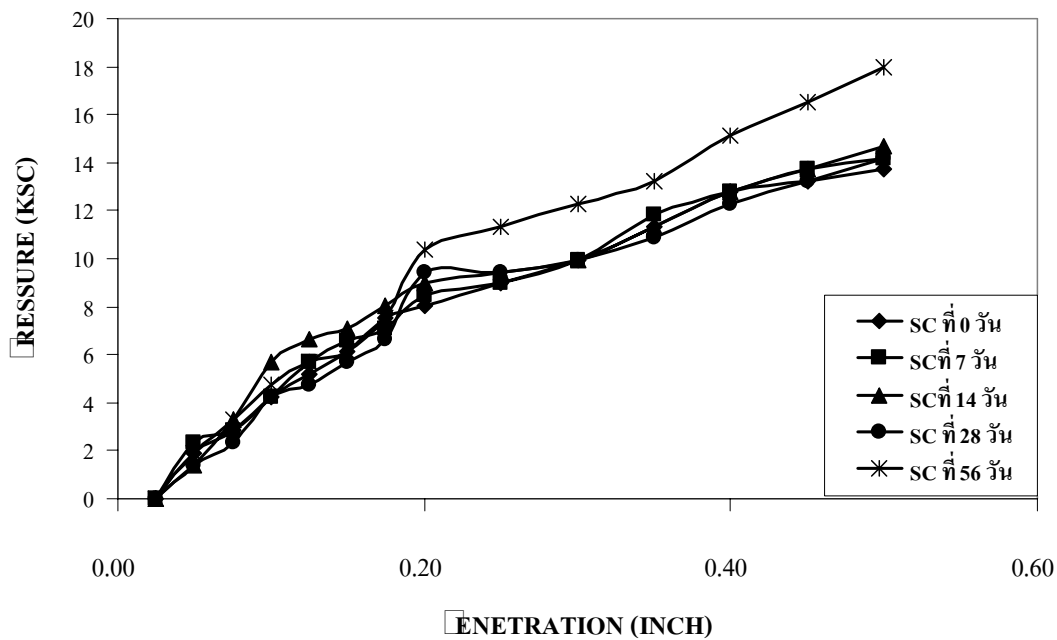


ก)

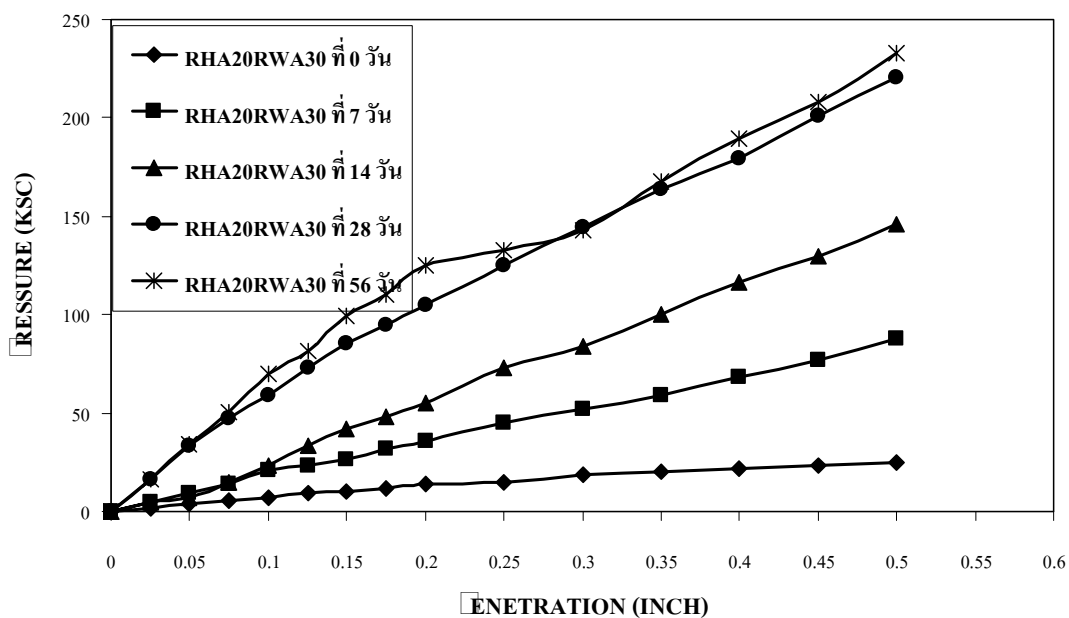
รูปที่ ก-15 พฤติกรรมกำลังอัดของดินที่ปรับปรุงที่อายุบ่ม 28 วัน ก) RWA20SC80-RWA50SC50

ภาคผนวก ข.

ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Penetration ของผลการทดสอบค่า
อัตราส่วนรับแรงแบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย (CBR)



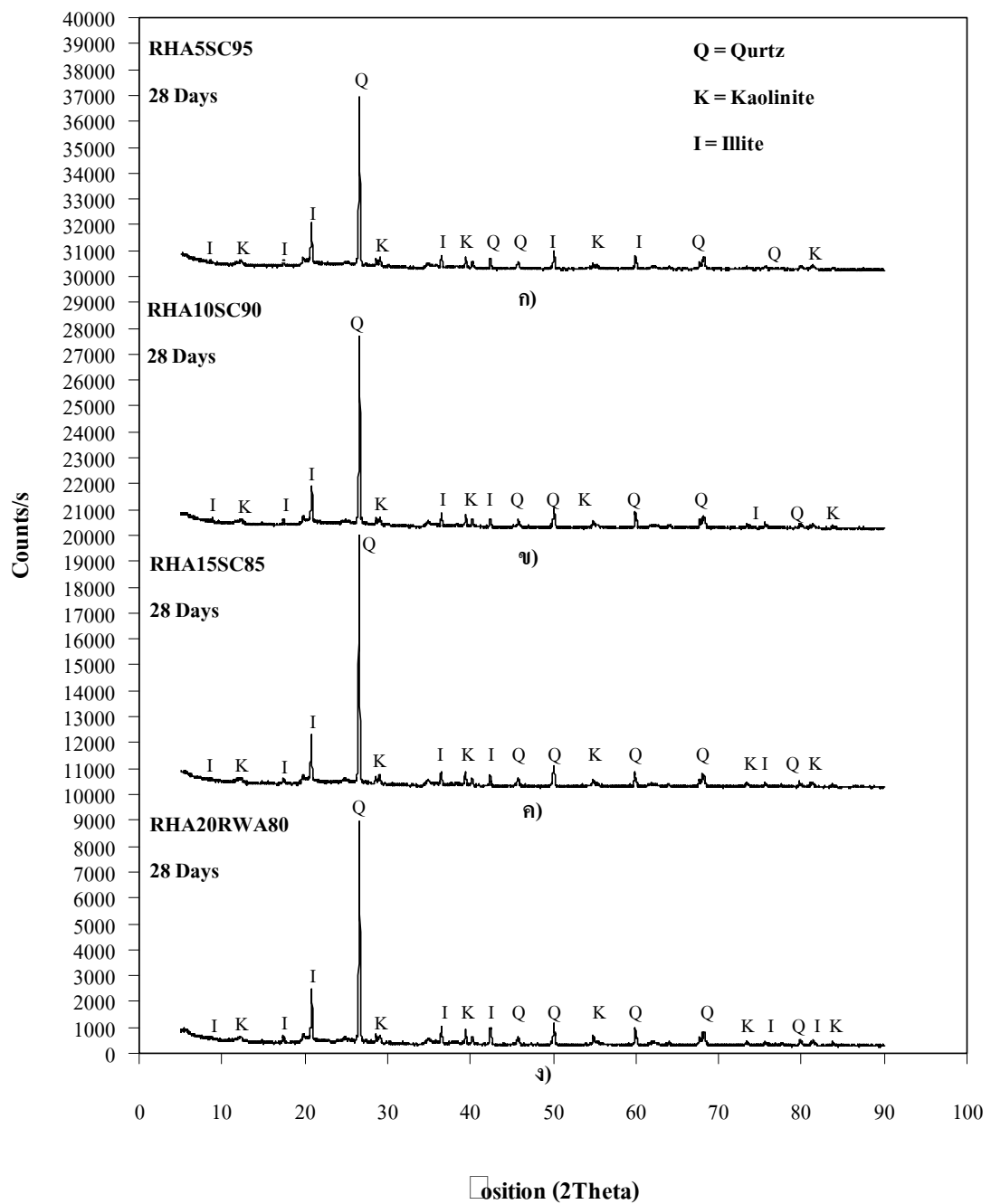
รูปที่ ข-1 พฤติกรรมอัตราส่วนแบกทานของดินเหนียวอ่อนสงขลา (บดอัด) ที่อายุบ่มต่างๆ



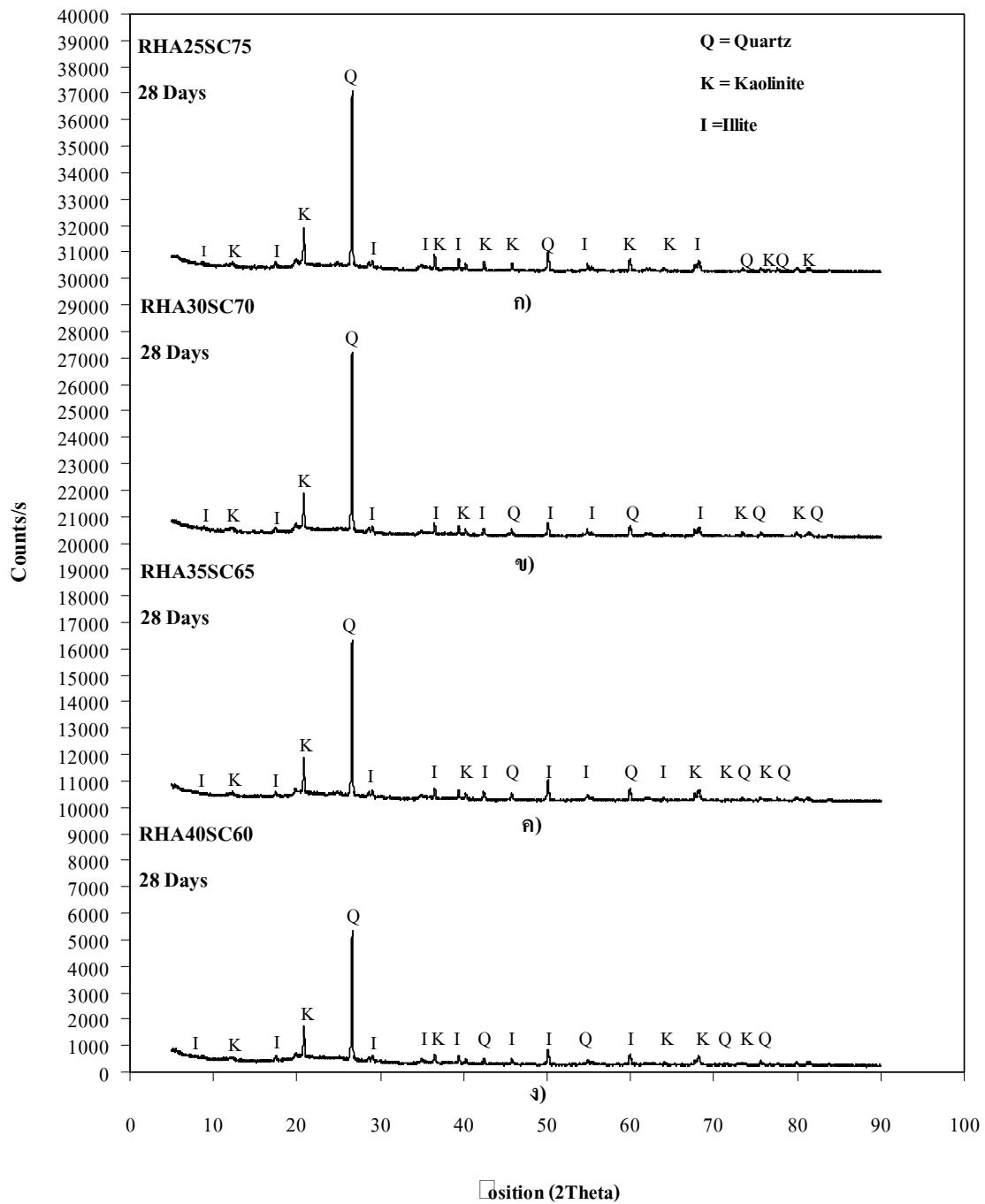
รูปที่ ข-2 พฤติกรรมอัตราส่วนแบกทานของดินผสมเถ้าแกลบ 20% และเถ้าไม้ยางพารา 30% ที่อายุบ่มต่างๆ

ภาคผนวก ค.

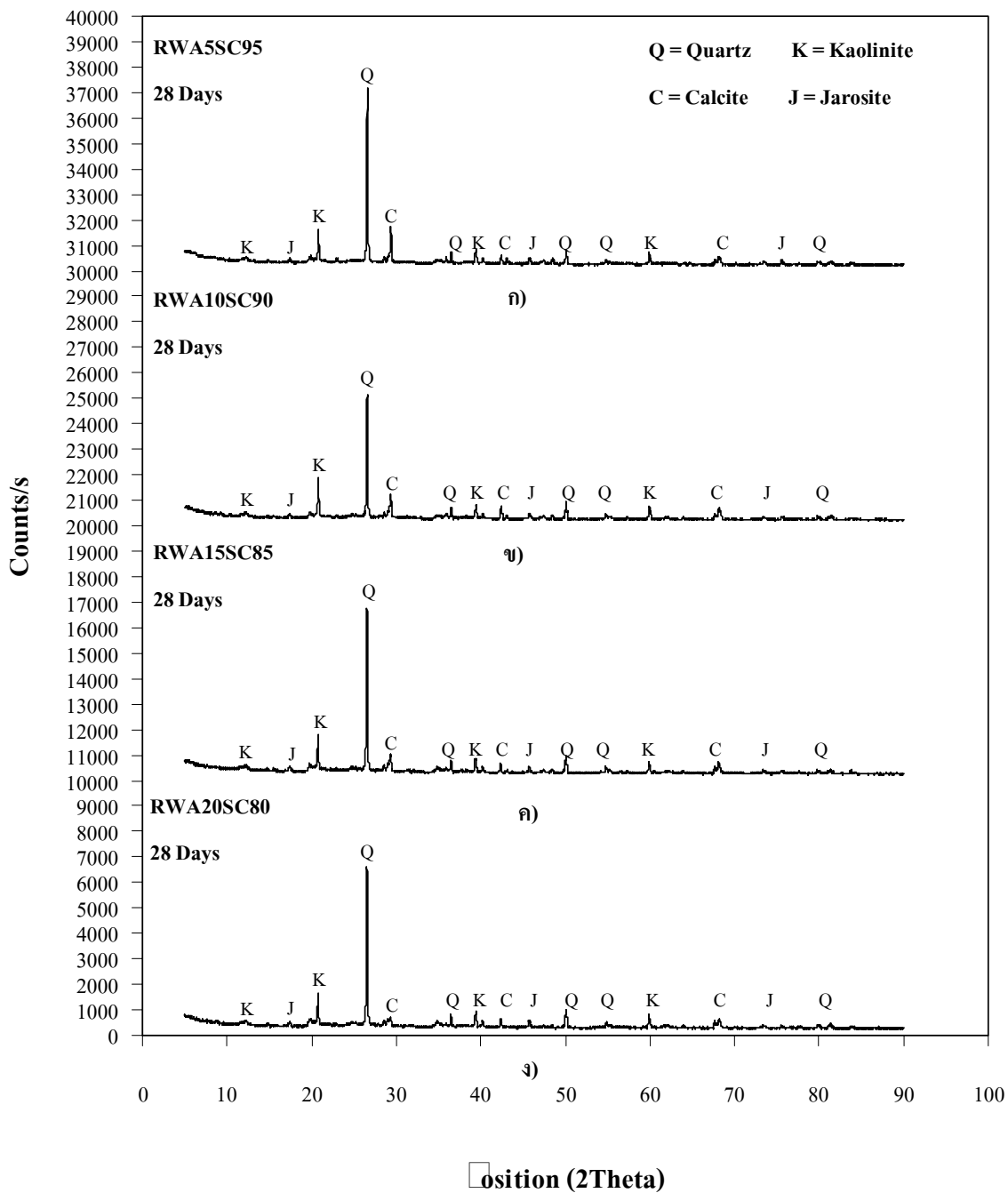
ลายเส้น XRD ของดินตัวอย่างทุกอัตราส่วนผสมที่อายุบ่ม 28 วัน



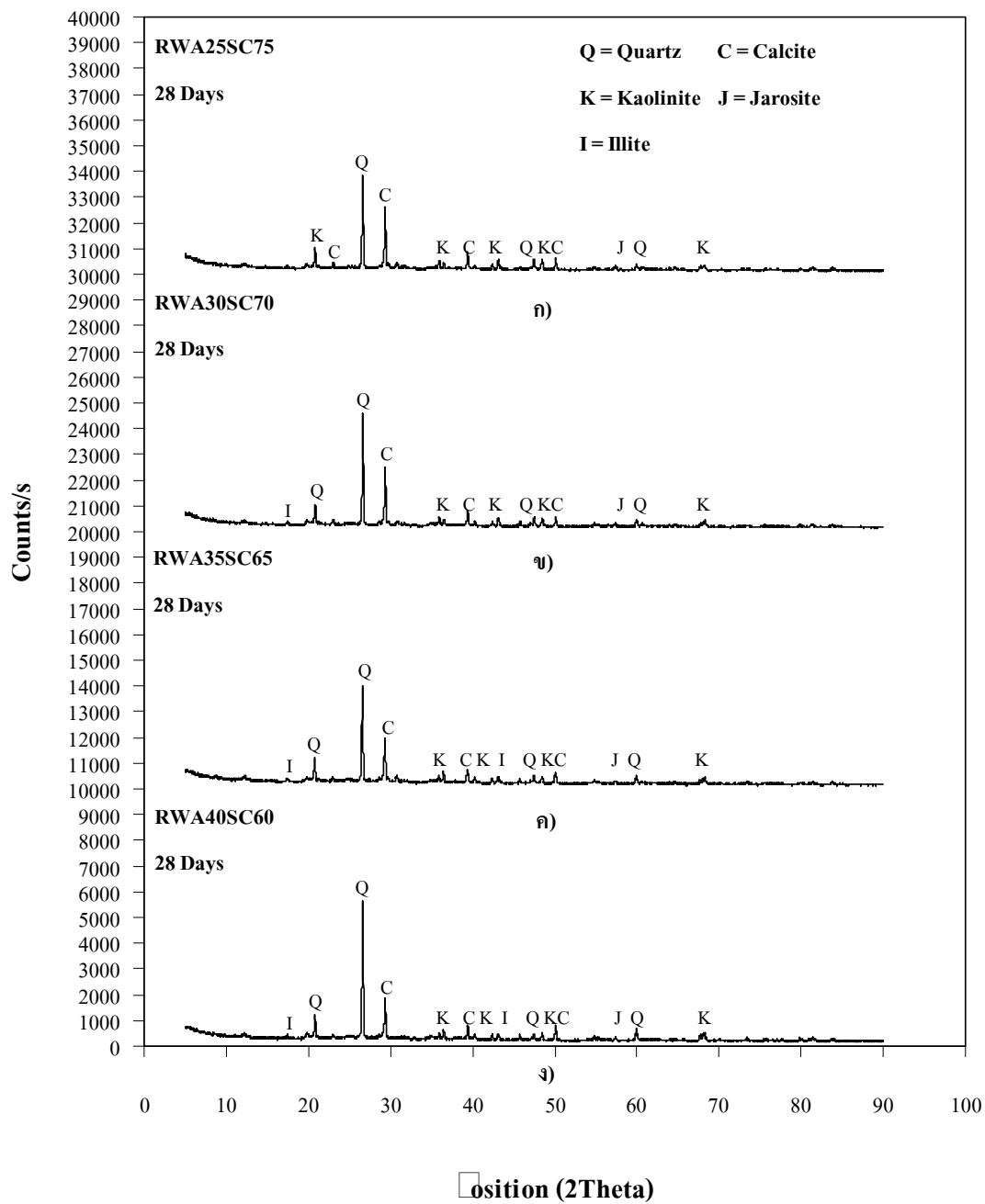
รูปที่ ก-1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลา (SC) หลังผสมด้วยเถ้าแกลบ (RHA) ที่อายุการบ่ม 28 วัน (ก) RHA5SC95 (ข) RHA10SC90 (ค) RHA15SC85 และ (ง) RHA20SC80



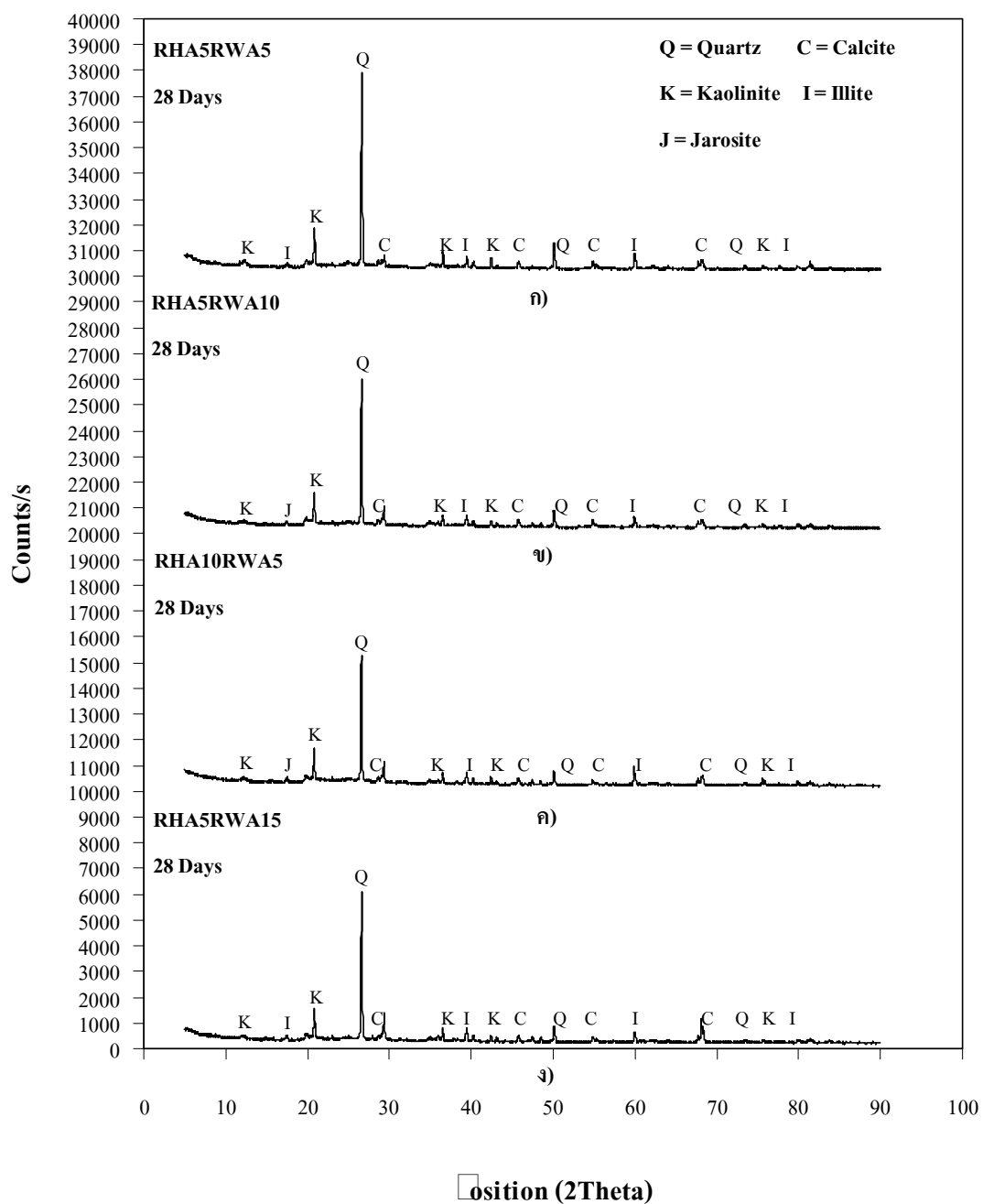
รูปที่ ก-2 ผลวิเคราะห์ห้องค้ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลา (SC) หลังผสมด้วยเถ้าแกลบ (RHA) ที่อายุการบ่ม 28 วัน (ก) RHA25SC75 (ข) RHA30SC70 (ค) RHA35SC65 และ (ง) RHA40SC60



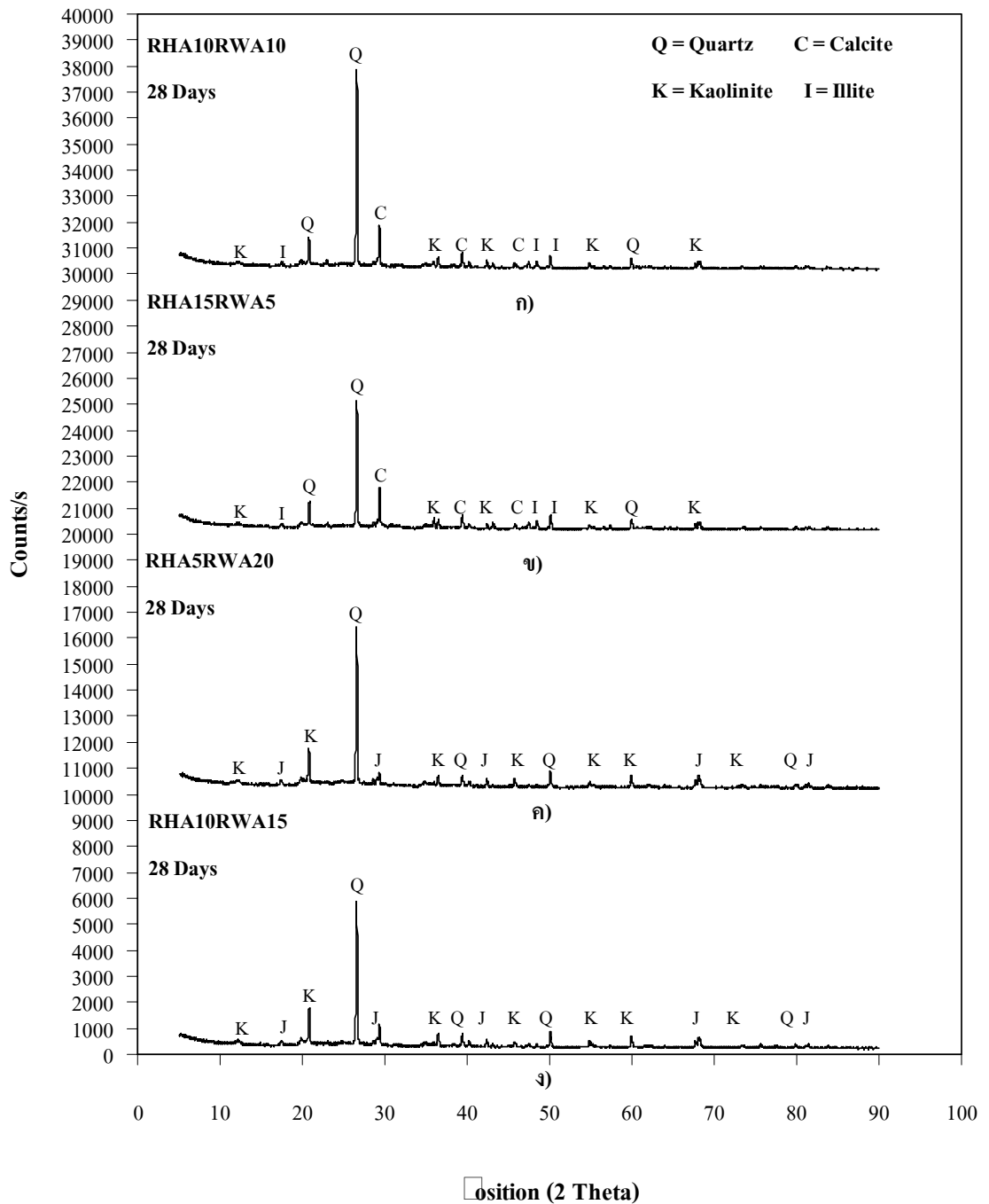
รูปที่ ๓-3 ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของดินเหนียวอ่อนสงขลา (SC) หลังจากผสมด้วยเถ้าไม้ยางพารา (RWA) ที่อายุการบ่ม 28 วัน (ก) RWA5SC95 (ข) RWA10SC90 (ค) RWA15SC85 (ง) RWA20SC80



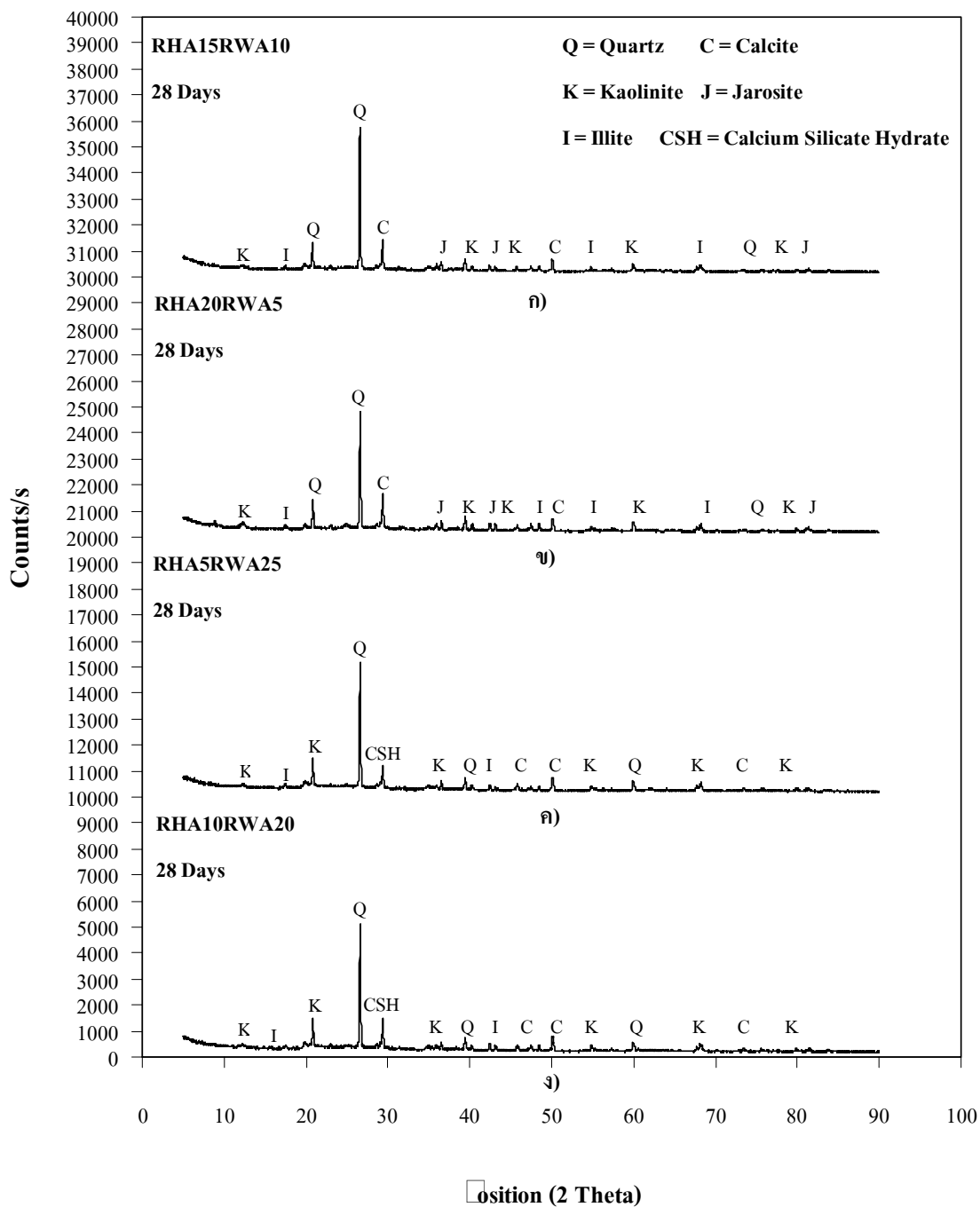
รูปที่ ๓-๔ ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของดินเหนียวอ่อนสงขลา (SC) หลังจากผสมด้วยเถ้าไม้ยางพารา (RWA) ที่อายุการบ่ม 28 วัน (ก) RWA25SC80 (ข) RWA30SC70 (ค) RWA35SC65 และ (ง) RWA40SC60



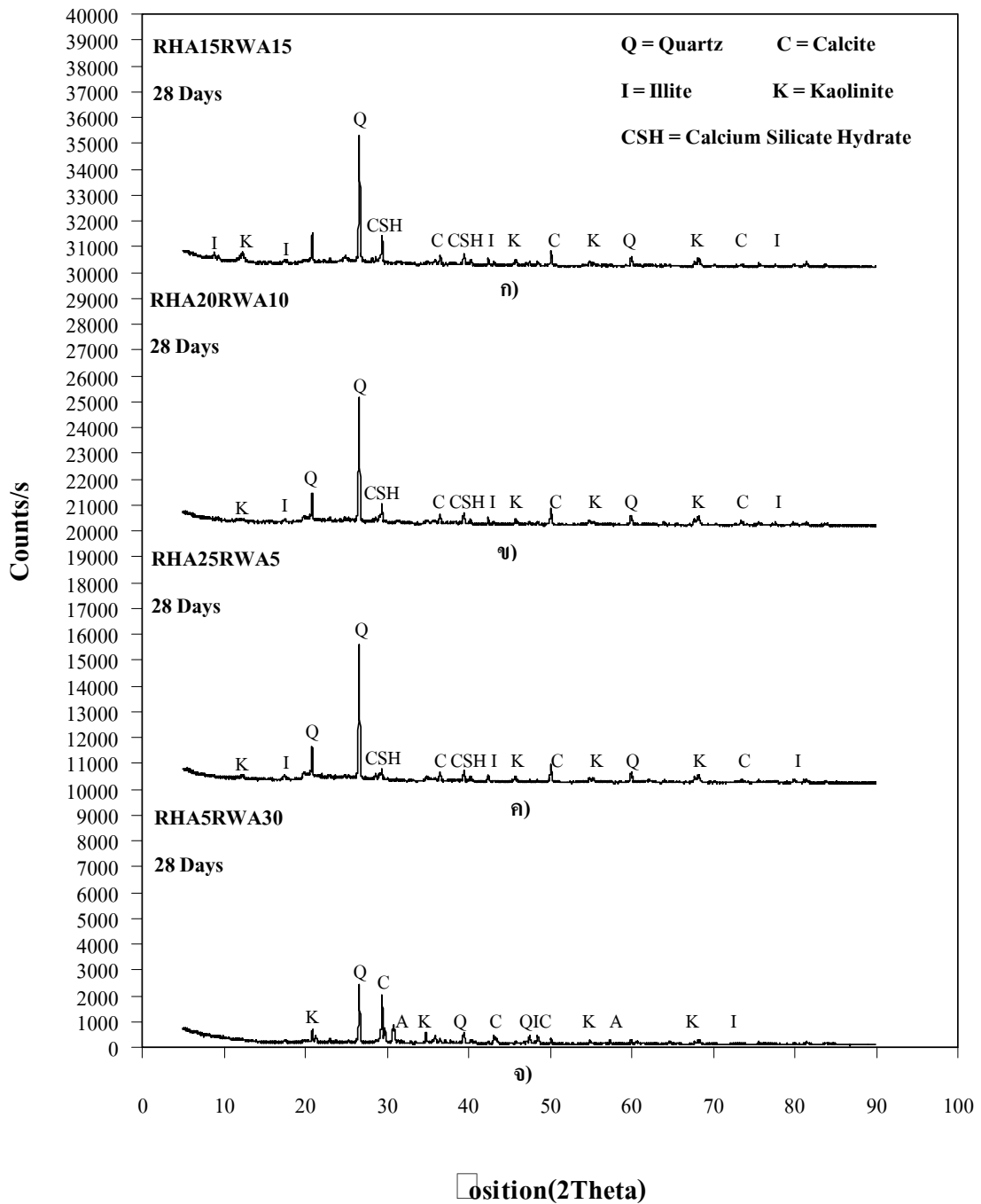
รูปที่ ๕-5 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลา (SC) หลังจากผสมด้วยเถ้าแกลบ (RHA) และเถ้าไม้ยางพารา (RWA) ที่อายุการบ่ม 28 วัน (ก) RHA5RWA5 (ข) RHA5RWA10 (ค) RHA10RWA5 และ (ง) RHA5RWA15



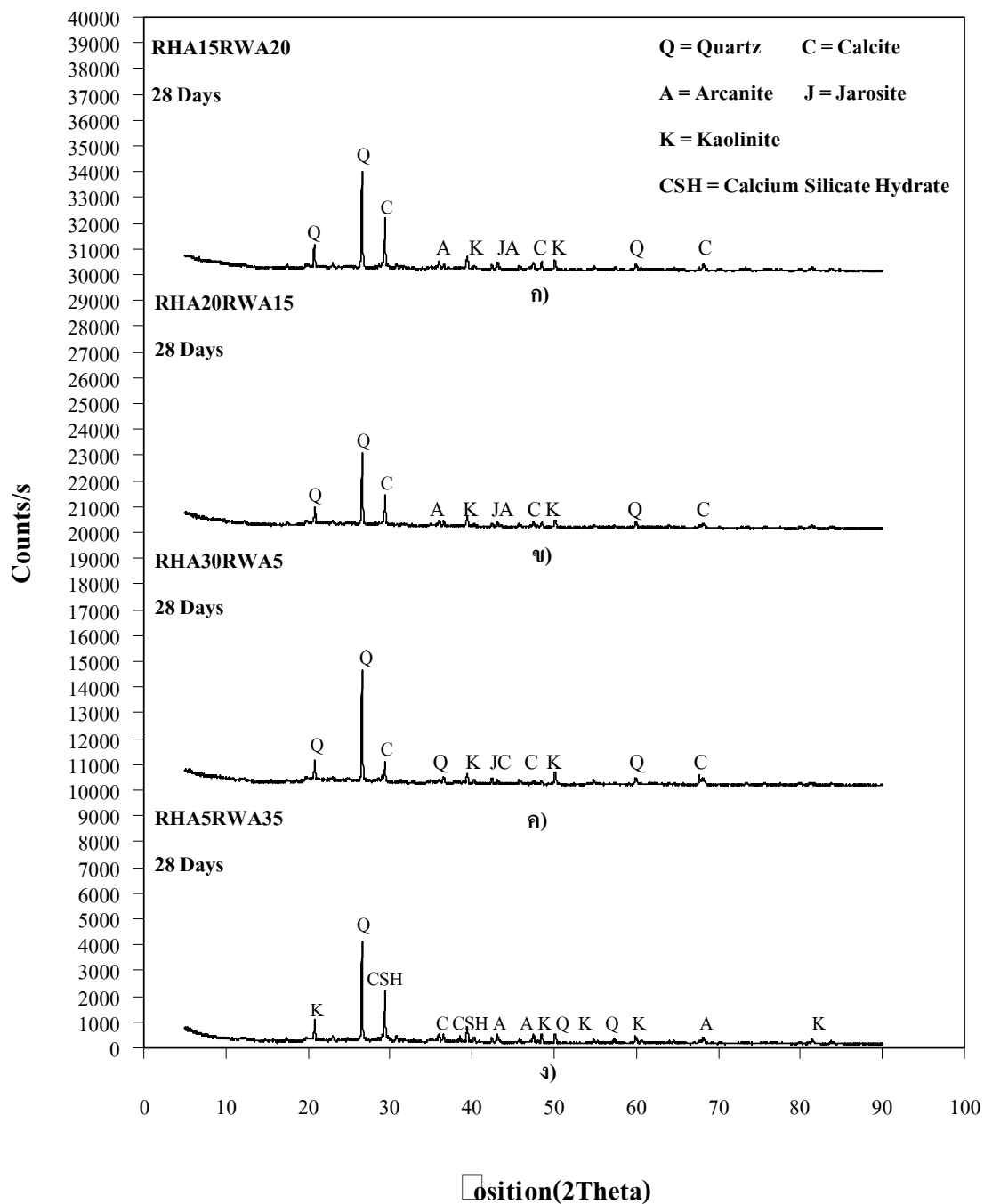
รูปที่ ๓-6 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลา (SC) หลังจากผสมด้วยเถ้าแกลบ (RHA) และเถ้าไม้ยางพารา (RWA) ที่อายุการบ่ม 28 วัน (ก) RHA10RWA10 (ข) RHA15RWA5 (ค) RHA5RWA20 และ (ง) RHA10RWA15



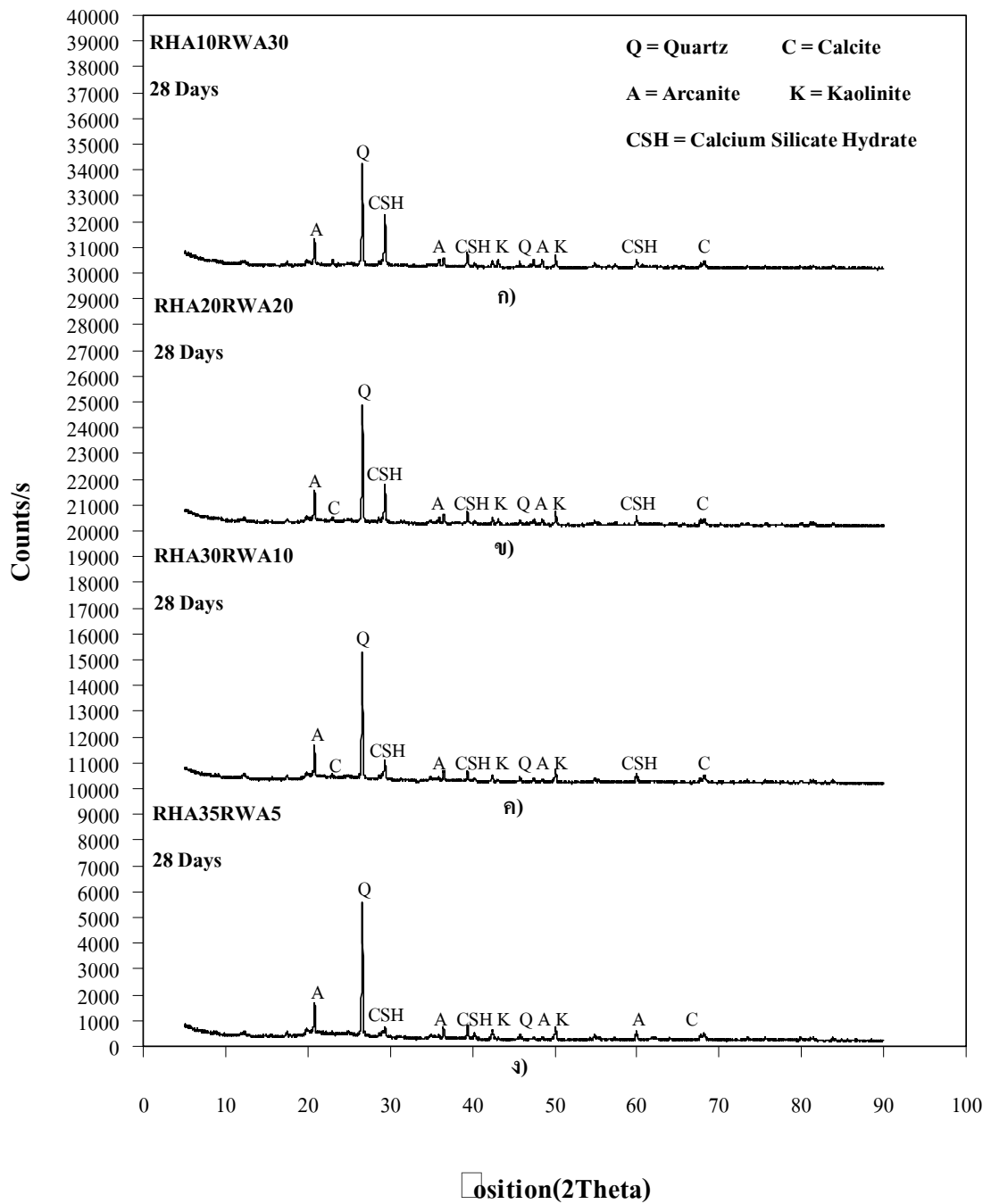
รูปที่ ค-7 ผลวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลา (SC) หลังจากผสมด้วยเถ้าแกลบ (RHA) และเถ้าไม้ยางพารา (RWA) ที่อายุการบ่ม 28 วัน (ก) RHA15RWA10 (ข) RHA20RWA5 (ค) RHA5RWA25 และ (ง) RHA10RWA20



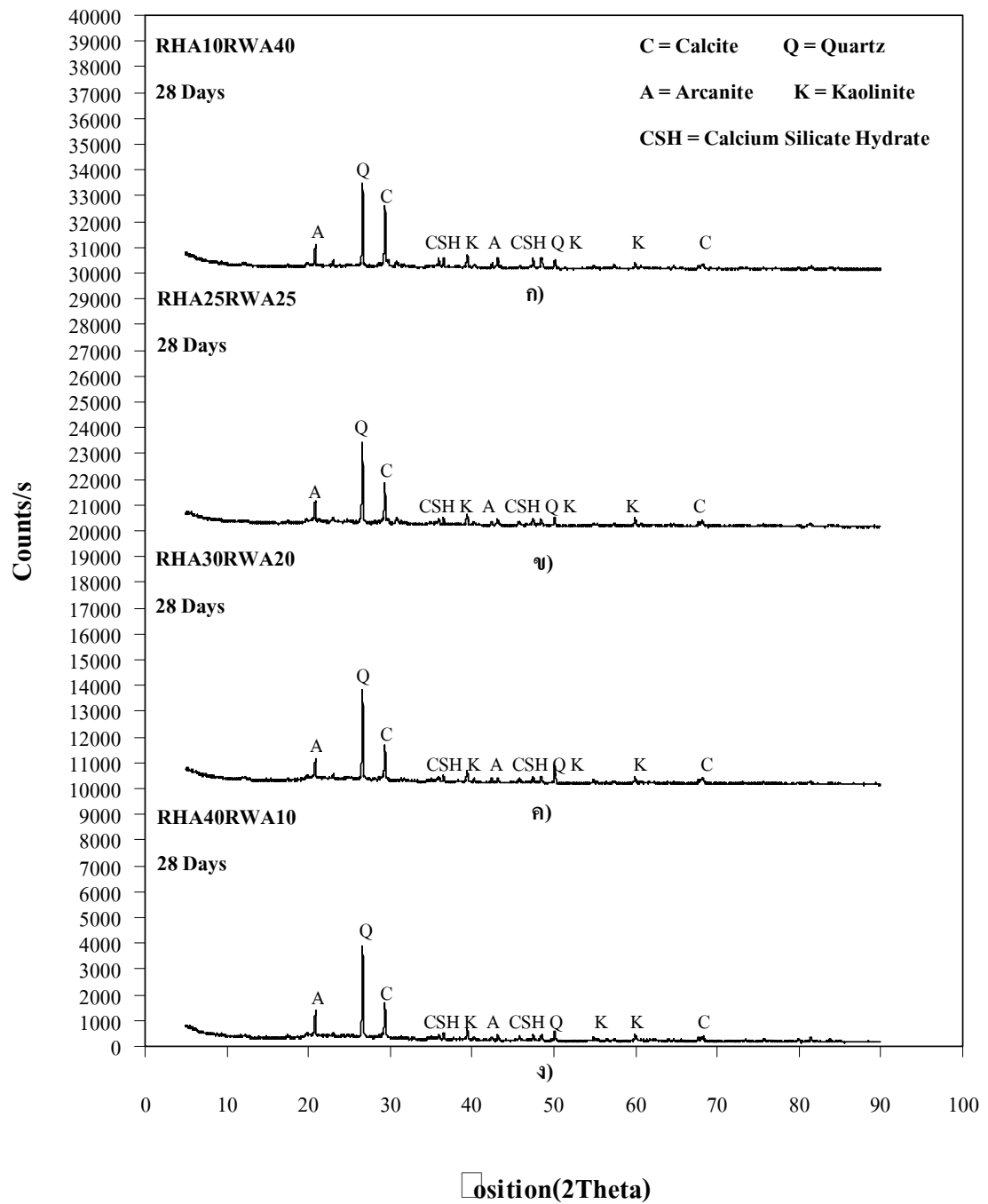
รูปที่ ๘-8 ผลวิเคราะห์ห้องค้ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลา (SC) หลังจากผสมด้วยเถ้าแกลบ (RHA) และเถ้าไม้ยางพารา (RWA) ที่อายุการบ่ม 28 วัน (ก) RHA15RWA15 (ข) RHA20RWA10 (ค) RHA25RWA5 และ (ง) RHA5RAW30



รูปที่ ๙-๙ ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของดินเหนียวอ่อนสงขลา (SC) หลังจากผสมด้วยเถ้าแกลบ (RHA) และเถ้าไม้ยางพารา (RWA) ที่อายุการบ่ม 28 วัน (ก) RHA15RWA20 (ข) RHA20RWA15 (ค) RHA30RWA5 และ (ง) RHA5RWA35



รูปที่ ค-10 ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของดินเหนียวอ่อนสงขลา (SC) หลังจากผสมด้วยเถ้าแกลบ (RHA) และเถ้าไม้ยางพารา (RWA) ที่อายุการบ่ม 28 วัน (ก) RHA10RWA30 (ข) RHA20RWA20 (ค) RHA30RWA10 และ (ง) RHA35RWA5



รูปที่ ๑-11 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวอ่อนสงขลา (SC) หลังจากผสมด้วยเถ้าแกลบ (RHA) และเถ้าไม้ยางพารา (RWA) ที่อายุการบ่ม (ก) RHA10RWA40 (ข) RHA25RWA25 (ค) RHA30RWA20 และ (ง) RHA40RWA10

ภาคผนวกการเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์

การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์ ก.

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 13-15 พฤษภาคม 2552

การปรับปรุงคุณสมบัติทางธรณีเทคนิคของดินเหนียวสงขลาด้วยเถ้า

จากของเสียอุตสาหกรรมเกษตร

Stabilization for Geotechnical Properties of Songkhla Clay with Ashes from Agro-Industrial Waste

อรุณ สุวรรณสุนทร (Arun Suwansuntorn)¹

ดนุพล ตันนโยภาส (Danupon Tonnyopas)²

พิพัฒน์ ทองฉิม (Pipat Tongchim)³

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

arun_20@windowslive.com

²รศ.ดร.หน่วยวิจัยธรณีเทคนิคและวัสดุก่อสร้างนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ *danupon.t@psu.ac.th*

³อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

pipat_thongchim@yahoo.com

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้เถ้าแกลบ เถ้าไม้ยางพาราและเถ้าทั้งสองผสมกันเพื่อในการปรับปรุงสมบัติดินเหนียวสงขลา ตัวอย่างดินแทนด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 ของน้ำหนักดินแห้งและบ่ม โดยควบคุมอากาศที่อายุ 1, 7, 14, 28 และ 56 วัน ดำเนินเตรียมและทดสอบก่อนตัวอย่างดินดังกล่าว ได้แก่ ชีดจำกัดความชื้นเหลว การบดอัดดินแบบมาตรฐาน กำลังอัดแกนเดี่ยว อัตราส่วนรับแรงแบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบแร่ด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยทั่วไปปริมาณความชื้นเหมาะสมและดัชนีพลาสติกผลของตัวอย่างปรับปรุงลดลงตามการเพิ่มเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา พบว่าดินเหนียวสงขลาที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 20 และเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 30 มีกำลังอัดแกนเดี่ยวสูงสุด 540 กิโลปาสคาล ขณะที่ค่าอัตราส่วนรับแรงแบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย ที่บ่ม 28 วันเท่ากับร้อยละ 21 และความเค้นสูงสุดที่แยกคดทับในอดีตที่อายุบ่ม 7 และ 14 วัน หน่วยแรงในอดีตเพิ่มเป็น 15 และ 820 กิโลปาสคาลตามลำดับ

ABSTRACT: The application research of rice husk ash (RHA), rubber wood ash (RWA) and both ash combinations for Songkhla clay stabilization was performed. The clay specimen was replaced with RHA and RWA in proportion of 0, 5, 10, 20, 30, 40 and 50% by dry weight of soil and the mixtures were stabilized in control ambient for a period of 1, 7, 14, 28 and 56 days. Atterberg limits, standard Proctor compaction and unconfined compressive strength (UCS), California bearing ratio (CBR), consolidation tests, X-ray diffraction and scanning electron microscope analysis were carried out on the RHA-RWA stabilized clay samples. Generally optimum moisture content and plasticity index of the treated clay samples decreased and reduced the plasticity index with addition of RHA and RWA. It was found that the addition of 20% RHA and 30% RWA obtained the maximum UCS of 540 kPa. While the optimal stabilized clay specimen yielded 28-day CBR value about 21% and 7 and 14-day pre-consolidation pressures up to 15 and 820 kPa.

KEYWORDS: Songkhla clay, Rice husk ash, Rubber wood ash, California bearing ratio, Consolidation

1. บทนำ

ดินเค็มในพื้นที่จังหวัดสงขลาโดยเฉพาะที่ลุ่มชายฝั่งมักเป็นดินอ่อน ซึ่งมีคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิคแย่มากจึงไม่เหมาะจะใช้เป็นชั้นดินคันทาง (Subgrade) หรือชั้นพื้นทาง (Base) โดยเฉพาะเรื่องการทรุดตัวและเสถียรภาพของไหล่ทางถนนซึ่งนำไปสู่การซ่อมบำรุงและอายุการใช้งานลดลง ทำให้สูญเสียงบประมาณเปล่าประโยชน์รวมถึงมีผลกระทบต่อการพัฒนาประเทศด้วย ประกอบกับต้องการนำวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมกระดาษที่ไม่ก่อประโยชน์และก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมมาใช้ให้เกิดประโยชน์กับงานทางด้านวิศวกรรม รวมถึงเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมด้วย

Basha et al. [1] ได้ประเมินปรับปรุงดินเหนียวอ่อนทางเคมีด้วยการผสมปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ มีผลให้สภาพพลาสติก และความหนาแน่นแห้งลดลง และปริมาณความชื้นเหมาะสมเพิ่มขึ้น และการเติมที่เหมาะสมที่ปูนซีเมนต์ 8% และเถ้าแกลบ 10-15% คนุพลและคณะ [2] ได้ศึกษาเถ้าไม้ยางพาราผสมใน

ปูนซีเมนต์ พบว่าเถ้าดังกล่าวมีปริมาณ CaO สูงถึง 58.17% ไม่ส่งผลต่อค่าดัชนีกำลังของปูนซีเมนต์สูงสุด แต่หากนำเถ้าลอยและเถ้าไม้ยางพาราผสมด้วยกันแทนที่ในปูนซีเมนต์ พบว่าให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น อันเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของซิลิกาในเถ้าลอยกับ CaO ที่อยู่ในปูนซีเมนต์ ที่เกิดหลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งพัฒนากำลังของดินเค็มทางเคมี ซึ่งเป็นดินอ่อนมาปรับปรุงสมบัติโดยใช้เถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบสิ่งปลูกสร้างต่างๆ บนชั้นดินคันทางสำหรับงานถนนหรืองานดินถม

2. วัสดุ และระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้

เก็บตัวอย่างดินเหนียวสงขลา (สัญลักษณ์ SC) บริเวณพื้นที่สวนสมเด็จ ที่ระดับความลึก 1.50–2.00 เมตร จากผิวดินเค็ม โดยเก็บตัวอย่างดินที่คงสภาพ (Undisturbed) และดินเปลี่ยนแปลงสภาพ (Disturbed) เถ้าแกลบเป็นเถ้าที่ได้มาจากการนำเปลือกข้าว (แกลบ) มาเผาจนเถ้าสีขาวขุ่นแล้วจึงนำมาบดและร่อนผ่าน

ตะแกรงเบอร์ 200 (สัญลักษณ์ RHA) เถ้าไม้ยางพารา เป็นเถ้าที่ได้จากการเผาไม้เพื่อค้มน้ำ ในโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา ที่ตำบลบ้านพรุ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา โดยนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (สัญลักษณ์ R□A) ในปฏิบัติการวิจัยผสมดินและเถ้าทั้งสองด้วยน้ำหนักแห้ง ได้กำหนดรหัสของสูตรสำหรับดินตัวอย่างในการศึกษาครั้งนี้ไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ตัวอย่างดินมีอัตราส่วนการผสมของเถ้าทั้งสองในงานวิจัยนี้

RHA (%)	R□A (%)	SC (%)	สัญลักษณ์
0	0	100	SC
5	0	95	RHA5
10	0	90	RHA10
20	0	80	RHA20
30	0	70	RHA30
40	0	□0	RHA40
50	0	50	RHA50
0	5	95	R□A5
0	10	90	R□A10
0	20	80	R□A20
0	30	70	R□A30
0	40	□0	R□A40
0	50	50	R□A50
5	5	90	RHA5R□A5
5	15	80	RHA5R□A15
10	10	80	RHA10R□A10
15	5	80	RHA15R□A5
5	25	70	RHA5R□A25
10	20	70	RHA10R□A20
15	15	70	RHA15R□A15
20	10	70	RHA20R□A10
25	5	70	RHA25R□A5
5	35	□0	RHA5R□A35
10	30	□0	RHA10R□A30
20	20	□0	RHA20R□A20

ตารางที่ 1 (ต่อ)

RHA (%)	R□A (%)	SC (%)	สัญลักษณ์
30	10	□0	RHA30R□A10
35	5	□0	RHA35R□A5
10	40	50	RHA10R□A40
20	30	50	RHA20R□A30
25	25	50	RHA25R□A25
30	20	50	RHA30R□A20
40	10	50	RHA40R□A10

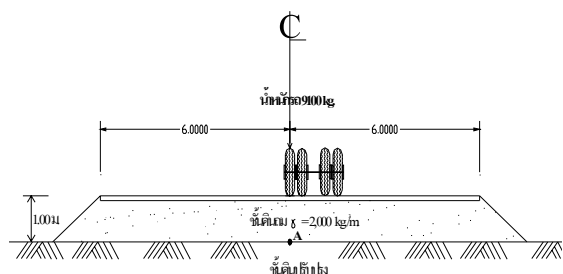
2.3 วิธีการวิจัย

ในการดำเนินการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานในกรณีที่เป็นดินเดิมของดินเหนียวสงขลา ก่อนนำ RHA และ R□A มาผสม โดยดำเนินการหาค่าปริมาณความชื้น ความถ่วงจำเพาะ พร้อมทั้งส่งตรวจสอบประกอบทางเคมีด้วยวิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนต์ (X-Ray Fluorescent) รวมถึงตรวจหาค่าประกอบแร่ที่เกิดขึ้นใหม่ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction-XRD) เพื่อศึกษาโอกาสในการเกิดสารประสานในการทำปฏิกิริยา

ในการดำเนินการทดสอบดินตัวอย่างหลังจากนำ RHA และเถ้าไม้ยางพารา (R□A) มาผสมตามแต่ละอัตราส่วนที่กำหนดแล้วทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานและวิศวกรรมรวมถึงทางเคมีของทุกอัตราส่วน โดยดำเนินการหาค่าความถ่วงจำเพาะ หาค่าพิกต์ความชื้นเหลว ทดสอบการบดอัดด้วยวิธีมาตรฐาน (Standard Proctor Test) ตามมาตรฐาน ASTM D □98 เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) และปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) ทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ตามมาตรฐาน ASTM D 21 □□ ทดสอบทุกอัตราส่วนผสมในการเตรียมใช้ปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) บดอัดด้วยวิธีมาตรฐานตามมาตรฐาน ASTM D □98 การเก็บตัวอย่าง โดยการห่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกและห่อหุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียม

อีกชั้นหนึ่งแล้วบรรจุลงในภาชนะปิดมิดชิดแล้วนำไปแช่ไว้ในอ่างบรรจุน้ำเพื่อป้องกันความชื้นระเหยออก บ่มเป็นเวลา 1, 7, 14, 28 และ 56 วัน ส่วนการทดสอบอัตราส่วนแบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย (California Bearing Ratio, CBR) แบบไม่แช่น้ำตามมาตรฐาน ASTM D 1883 โดยใช้ดินเฉพาะอัตราส่วนที่ให้ค่า UCS สูงสุดเท่านั้นและอัตราส่วนที่ SC บ่มตัวอย่างที่อายุ 1, 7, 14, 28 และ 56 วัน

การทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 2435 ทดสอบใช้ดินอย่างที่เป็น SC (ดินคงสภาพ) ดิน SC (บดอัด) และดินหลังจากผสมกับเถ้าทั้งสองใช้เฉพาะอัตราส่วนที่ให้ค่า UCS สูงสุดเพียงอัตราส่วนเดียวเท่านั้น บ่มดินตัวอย่างที่อายุ 7 และ 14 วัน โดยการประยุกต์ใช้น้ำหนักที่มากกว่าจากน้ำหนักของรถบรรทุกพ่วงที่มีน้ำหนักต่อล้อสูงสุดรวมกับน้ำหนักของดินถมมากกว่าที่จุด A เป็นน้ำหนักที่มากกว่าต่อดินตัวอย่างดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 น้ำหนักรถและน้ำหนักดินถมที่มากกว่าต่อชั้นดินปรับปรุงจุดที่ A

วิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของตัวอย่างดินที่เกิดขึ้นใหม่ด้วย XRD ทุกอัตราส่วนผสมที่ประกอบด้วย RHA และ RFA ที่อายุบ่ม 14 วัน นอกจากนี้ตัวอย่างดินที่อัตราส่วนผสมให้ค่า UCS สูงสุด ได้วิเคราะห์เพิ่มเติมที่อายุบ่ม 7, 28 และ 56 วัน รวมถึงตรวจการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้อง

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

3. ผลและอภิปรายผล

3.1 สมบัติเบื้องต้นของดินเดิม

ดินเหนียวสงขลาเกิดจากการทับถมของดินตะกอนอยู่ใกล้ทะเลจึงมีการปนเปื้อนคลอไรด์ สสารอินทรีย์ และ ซัลเฟตในปริมาณสูง ผลการทดสอบดินเหนียวสงขลามีค่า UCS ก่อนข้างต่ำ และมีค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ ($N\%C$) ก่อนข้างสูงตามตารางที่ 2 ซึ่งพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินดังกล่าวไม่เหมาะสมกับงานวิศวกรรมการทาง และด้านวิศวกรรมอื่นๆ

3.2 องค์ประกอบทางเคมี

ผลการตรวจองค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวสงขลา (SC) พบว่ามี SiO_2 และ Al_2O_3 รวมกันเท่ากับ 7.47% เป็นองค์หลัก ซึ่งเหมาะในการการปรับปรุงสมบัติทางวิศวกรรมด้วยวิธีทางเคมี สำหรับองค์ประกอบของ RHA มี SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมได้ 89.17% มีปริมาณ SO_3 เท่ากับ 0.47% และไม่พบ Na_2O ส่วนค่า LOI มีเพียง 5.13% เท่านั้น เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน ASTM C 118 จัดเป็นสาร Pozzolana Class N ส่วน RFA มี $SiO_2+Al_2O_3$ และ Fe_2O_3 รวมกันเท่ากับ 1.15% มีปริมาณ SO_3 เท่ากับ 5.57% และไม่พบ Na_2O ส่วนค่า LOI มีค่าเท่ากับ 28.58% ซึ่งไม่จัดเป็นปอซโซลาน แต่เนื่องเถ้าดังกล่าวมีปริมาณของ CaO มากถึง 45.01% จึงมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เช่นเดียวกับการผสมปูนซีเมนต์ แต่มีตารางที่ 2 สมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวสงขลา

สมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียว สังขลา	ค่าหรือปริมาณ
1) สมบัติทางกายภาพ	
ปริมาณน้ำตามธรรมชาติ (%)	7□44
พิกัดเหลว (LL)	53.37%
พิกัดพลาสติก (PL)	28.3□%
ดัชนีพลาสติก (PI)	25.01%
ความถ่วงจำเพาะ (Gs)	2.□4
2) สมบัติทางวิศวกรรม	
หน่วยน้ำหนักทั้งหมด (γ_t)	1.491
กำลังอัด (กิโลกรัม/ตร.ซม.)	0.1□
Sensitivity	0.31
โมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50})	2.29
Strain at Failure (ϵ_p)	18.24
3) สมบัติทางเคมี	
pH	3.15
คลอไรด์ (%)	3.50
สสารอินทรีย์ (%)	38.99
ซัลเฟต (%)	2.31

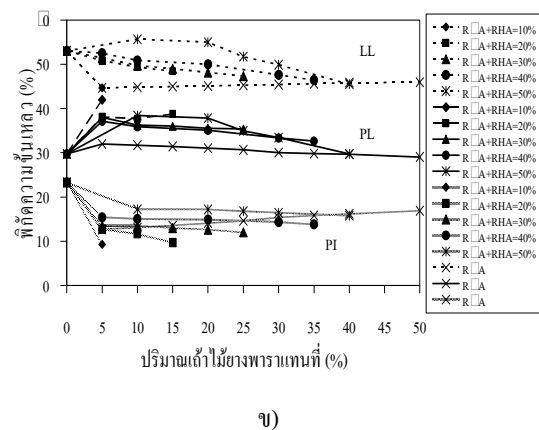
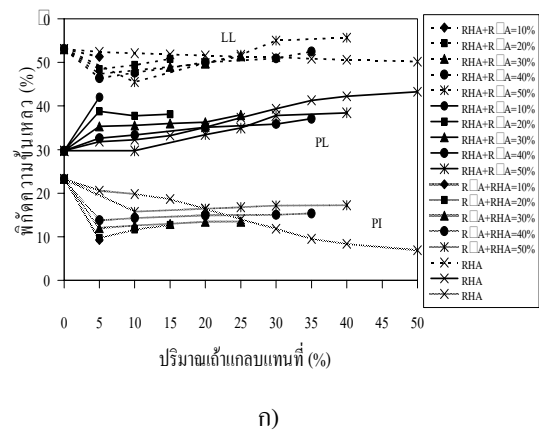
ค่า LOI สูงถึง 28.58% เนื่องจากการเผาในระบบเปิดจึงยังคงมีคาร์บอนสสารอินทรีย์อยู่อีกมากดังตารางที่ 3

3.3 พิกัดความชื้นเหลวหลังเติมเถ้า

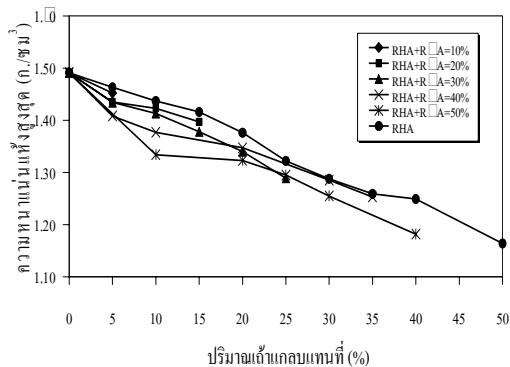
ตัวอย่างดินผสม RHA และ R□A ในอัตราส่วนต่างๆ กัน ซึ่งหากผสม RHA หรือ RHA+R□A ในอัตราส่วนที่ RHA เพิ่มขึ้นมีผลให้ค่า LL, PL และ PI เพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีตัวอย่างดินผสม R□A หรือ R□A+RHA ให้ผลในทางตรงข้ามคือ ค่า LL, PL และ PI ลดลง ดังรูปที่ 2 ซึ่งสอดคล้องกับ ดิษฐพรและคณะ [3] กล่าวว่าการผสมเถ้าไม้ยางพาราทำให้ค่าความชื้นเหลวของดินลดลง แต่จะช่วยเพิ่มค่าความสามารถในการทำงานได้ดีขึ้น (□orkability)

3.4 ผลกระทบต่อการบดอัด

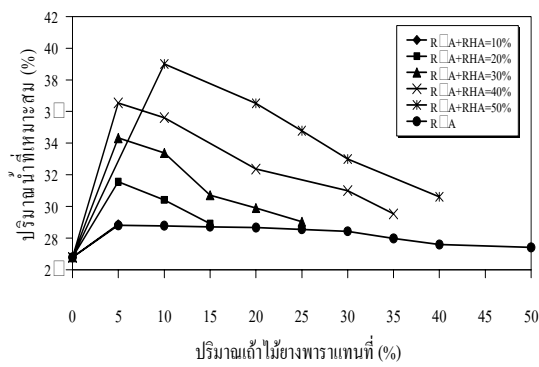
การบดอัดดินหลังจากผสม RHA และ R□A ในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยที่เปอร์เซ็นต์ของเถ้าทั้งสองเพิ่มเติมส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งมีค่าลดลง ดังรูปที่ 2 และเมื่อพิจารณาผลค่า OMC ปรากฏว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นของเถ้าทั้งสองชนิด



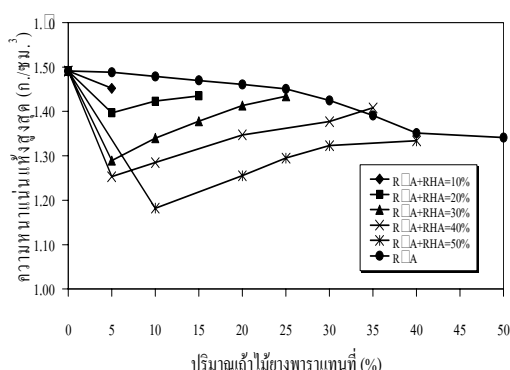
รูปที่ 2. พิกัดความชื้นเหลวของดินผสม RHA และ R□A



ก)

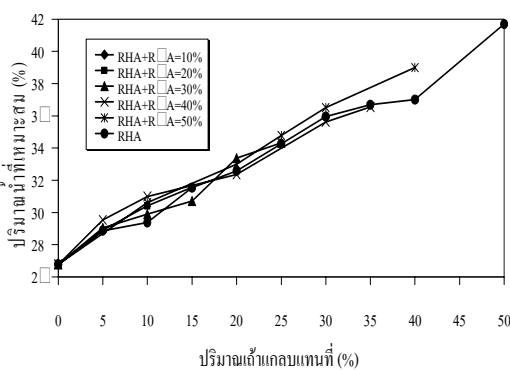


ข)



ข)

รูปที่ 3 ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินผสม RHA และ RFA



ก)

รูปที่ 4 ปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินผสม ก) RHA และ ข) RFA

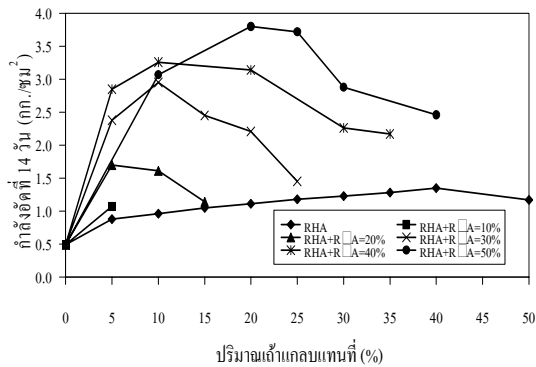
ดังรูปที่ 3 ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวจะช่วยลดปริมาณความชื้นในดินตามธรรมชาติ (N_C) ของดินเดิมโดยผลการทดสอบสอดคล้องกับ Basha et al. [1]

3.5 ผลกระทบต่อกำลังอัด

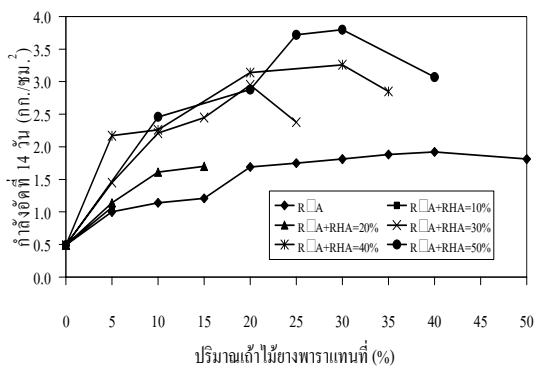
กำลังอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 14 วัน ปรากฏว่าอัตราส่วนRHA20R_{FA}30 ได้ผลค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 540 kPa. และมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทุกอัตราส่วนคือ ค่า UCS เพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าผสม RHA และ RFA มากเกินอัตราส่วนที่เหมาะสมจะมีผลทำให้ค่า UCS ลดลง (รูปที่ 5) สมมาตรและคณะ [4] ได้กล่าวไว้ว่าการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเป็นปฏิกิริยาสำคัญในการทำให้ค่า UCS เพิ่มมากขึ้น แต่จากซิลิกาในดินที่มีอยู่จำนวนจำกัดและถ้าปริมาณ CaO มีมากกว่าความต้องการในการทำปฏิกิริยากับซิลิกาในดินซึ่งทำให้ค่า UCS ไม่เพิ่มขึ้นแต่อาจทำให้ลดลงได้

3.6 ผลกระทบต่อ California Bearing Ratio

CBR ของตัวอย่างผสมเถ้าทั้งสองในอัตราส่วน RHA20R_{FA}30 มีค่าเท่ากับ 21% ที่ 28 วัน ซึ่งมากกว่า SC มีค่าเพียง 1.0% เท่านั้น (รูปที่ 5) จึงมีความเป็นไปได้ที่จะปรับปรุงคุณสมบัติดินเดิมเพื่อให้สามารถใช้งานทางวิศวกรรมการทาง



ก)



ข)

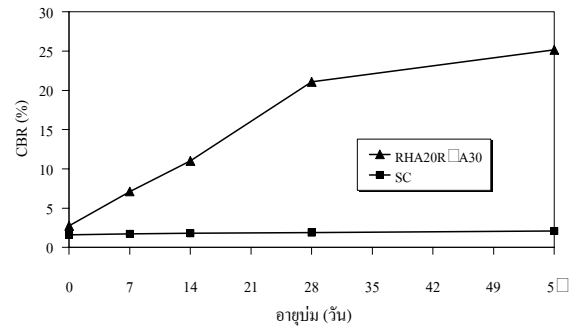
รูปที่ 5 UCS ของดินผสม ก) RHA และ ข) R□A อายุบ่ม 14 วัน

3.7 ผลกระทบต่อการยุบอัดตัวคายน้

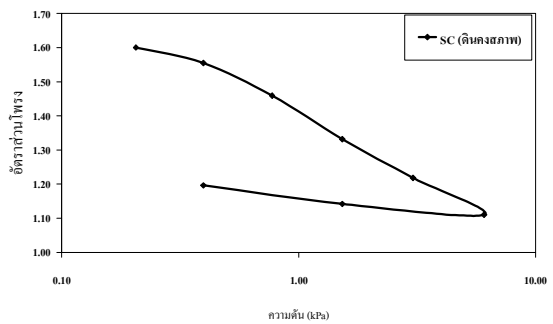
ตัวอย่างดิน RHA20R□A30 ช่วยลดอัตราการยุบตัว และเพิ่มค่าความเค้นสูงสุดที่เคยกดทับในอดีต (P_c) ให้สูงขึ้น โดยผลการทดสอบของ SC (ดินเดิมคงสภาพ) ดินที่ปรับปรุงด้วยการวิธีการบดอัดและผสมเถ้าทั้งสอง ที่อายุบ่ม 7 (รูปที่ 7) และ 14 วัน (รูปที่ 8) มีค่าคงตัวของการยุบอัดตัว ดังตารางที่ 5

3.8 แร่ประกอบและ โครงสร้างจุลภาพ

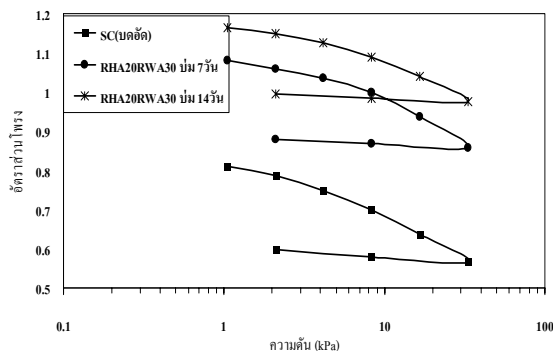
ผลการตรวจแร่ประกอบในดินพบ CSH เกิดขึ้น ทุกอายุการบ่ม ตั้งแต่อายุการบ่มที่ 1, 7, 14, 28 และ 5□ วัน มีค่าเท่ากับ 8.79%, 10.□8%, 15.□5% และ 1□03% ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 6 พัฒนาการค่า CBR กับอายุบ่ม



รูปที่ 7 ค่าอัตราส่วนไทรงกับความดันของ SC (คงสภาพเดิม)



รูปที่ 8 พฤติกรรมของอัตราส่วนไทรงกับความดัน

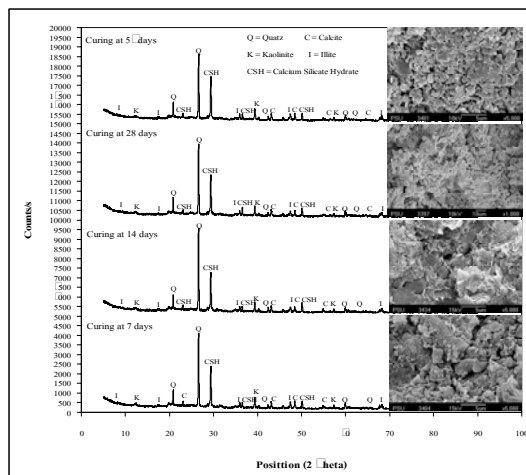
ตารางที่ 5 ค่าคงที่การยุบอัดตัว (Compressibility Parameter)

Compressibility Parameter	SC (สภาพเดิม)	SC (อัดบด)	RHA20 R□A30 บ่ม 7 วัน	RHA20 R□A30 บ่ม 14 วัน
P _c (ksc)	0.50	2.30	□15	8.20
C _c	0.271	0.490	0.3809	0.27□1
C _r	0.0□25	0.0958	0.0445	0.03□□

P_c = Pre-consolidation Pressure; C_c = Compression Index

C_r = Recompression Index

แต่จะมีค่าแนวโน้มคงที่ที่อายุ 5 วัน รูปที่ 9 การตรวจ SEM พบว่าโครงสร้างช่องว่างเนื้อดินลดลงตามอายุการบ่ม ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ลายพิมพ์องค์ประกอบแร่และโครงสร้างจุลภาคของดินอัตราส่วน RHA20R A30 อายุบ่ม 14 วัน

4. สรุปผล

1. การนำ RHA และ R A มาผสมส่งผลให้ค่าดัชนีพลาสติก (PI) ลดลง ทำให้การบดอัดง่ายขึ้น มีค่าความหนาแน่นลดลง ซึ่งมีความเหมาะสมในการทำงานถนน และผลเป็นเช่นเดียวกับการผสมซีเมนต์

2. การผสม RHA และ R A สามารถส่งผลอัตราส่วนโพรงลดลง ให้กำลังอัดสูงขึ้น ส่วนค่า CBR อยู่ในระดับดีซึ่งมีความเหมาะสมที่สามารถนำมาใช้เป็นรองพื้นทาง (Subbase) หรือพื้นทาง (base) ได้

3. ถ้า RHA และ R A ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและ ปอซโซลานได้ โดยเกิดเป็นสารประกอบ CSH ซึ่งมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามอายุการบ่มถึงแม้จะมีสารปนเปื้อนจากน้ำทะเล

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนงบวิจัยส่วนหนึ่งจากงบประมาณประจำปี 2548

บรรณานุกรม

- [1] Basha. E.A, Hashim. R. and Mahmud. H.A, 2005. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement, *Construction and Building Material*; 19() p 448-453
- [2] ดนุพล ดันนโยภาส, ชัดเจน ฤติวรุพท์, และอำพล กิติโชติ. 254 ผลกระทบจากการเติมเถ้าลอย และเถ้าชี้เลี้ยงไม่แยงพาราที่มีต่อมอร์ตาร์ปอร์แลนด์ซีเมนต์. *การประชุมทางวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 14-1 พ.ศ. 254* ขึ้นนครินทร์ จังหวัดกาญจนบุรี
- [3] ดิชฐพร แก้วมณีโชค ดนุพล ดันนโยภาส และพิพัฒน์ ทองฉิม, 2551. พฤติกรรมทางกายภาพ-เชิงกลของส่วนผสมดินเหนียวปากพั้งกับเถ้าไยปลั่มน้ำมันและเถ้าไม่แยงพาราที่อัดประสานด้วยตนเอง *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13 รร.จอมเทียน ปลั่มบิซ พัทยา จ.ชลบุรี 14-1 พฤษภาคม 2551* หน้า (MAT) Page 387-(MAT) Page 392. (CD-ROM)
- [4] สมมาตร สวัสดิ์ สราวุธ จริตงาม ดนุพล ดันนโยภาส พิพัฒน์ ทองฉิม, 2550. การปรับปรุงดินคันทางอ่อนโดยการผสมซีเมนต์กรณีศึกษาจังหวัดสงขลา *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12 รร.อัมรินทร์ ลาภูน จ.พิษณุโลก 2-4 พฤษภาคม 2550* หน้า (CD-ROM)

การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์ ข.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 21-22 พฤษภาคม 2552

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7
21-22 พฤษภาคม 2552

ผลกระทบของการผสมตัวปรับสภาพเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารามีต่อดินเหนียวสงขลา สำหรับวัสดุคั่นทาง

Effect of Rice Husk Ash and Rubber Wood Ash Stabilizers Mixing on Songkhla Clay Properties for Subgrade Materials

อรุณ สุวรรณสุนทร^{1*} ดนุพล ตันนโยภาส² พิปัท ทองฉิม³

^{1,3}ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

²หน่วยวิจัยธรณีเทคนิคและวัสดุก่อสร้างนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

E-mail: arun_20@windowslive.com

Arun Suwansuntron^{1*} Danupon Tonnayopas² Pipat Tongchim³

^{1,3}Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

²Geotechnical and Innovative Construction Materials Research Unit, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,
Hat Yai, Songkhla 90112

E-mail: arun_20@windowslive.com

บทคัดย่อ

ศึกษาการปรับสภาพดินเหนียวสงขลาทางเคมีด้วยการใช้เถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักและบ่มที่อายุ 1, 7, 14, 28 และ 56 วัน ทำการทดสอบประเมินสมบัติทั้งของดินบ่าบัดและไม่บ่าบัด อันได้แก่ การทดสอบพิกัดแอตเทอร์เบอร์ก การบดอัดแบบมาตรฐาน กำลังอัดแกนเดียว อัตราส่วนรับแรงแบกทาน การอัดตัวคายน้ำและวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าทั้งเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา ลดสภาพพลาสติกดินลง ในแง่สภาพการบดอัดการเติมเถ้าทั้งสองได้ลดความหนาแน่นแห้งสูงสุดลงและเพิ่มปริมาณน้ำที่เหมาะสมขึ้น จากมุมมองสภาพพลาสติก คุณลักษณะการบดอัดและพฤติกรรมสำหรับวัสดุคั่นทาง เสนอแนะว่าปริมาณเหมาะสมในการเติมเถ้าแกลบร้อยละ 20 และเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 30

คำหลัก: ดินเหนียวสงขลา, ตัวปรับสภาพ, เถ้าแกลบ, เถ้าไม้ยางพารา, วัสดุคั่นทาง

Abstract

Stabilization of Songkhla clay (SC) is studied by chemically using standalone rice husk ash (RHA), rubber wood ash (RWA) and combinations were partially replacement of 0, 5, 10, 20, 30, 40 and 50 wt.% SC at 1, 7, 14, 28 and 56 days curing periods. Experimental investigation includes the evaluation of such properties of the natural and treated SC specimens as Atterberg limits, standard Proctor compaction, unconfined compressive strength (UCS), California bearing ratio, consolidation tests and X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope analysis (SEM). Test results reveal that both RWA and RHA reduce the plasticity of SC. In term of compactability, addition of RWA and RHA decreases the maximum dry density and increases the optimum moisture content. From the viewpoint of plasticity, compaction and California bearing ratio characteristics for typical subgrade

materials, addition of 20% RHA and 30% RWA is recommended as an optimum amount.

Keywords: Songkhla clay, Stabilizer, Rice husk ash, Rubber wood ash, Subgrade materials

1. คำนำ

การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานในภาคใต้ มักจะประสบกับอุปสรรคและเกิดปัญหาจากดินในพื้นที่เดิมที่ขาดความเหมาะสมอย่างมาก ซึ่งจะมีสมบัติและพฤติกรรมทางวิศวกรรมแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ในบางครั้งก็อาจหลีกเลี่ยงอุปสรรคและปัญหาดังกล่าวได้โดยการเปลี่ยนสถานที่ก่อสร้างหรือแนวเส้นทางใหม่ แต่หากไม่สามารถเลี่ยงได้ จำเป็นต้องแก้ไขเกี่ยวกับเสถียรภาพของดิน ซึ่งดินเหนียวสงขลา (Songkhla Clay-SC) อันประกอบไปด้วยตะกอนดินเลนชายทะเล (Mangrove Deposits) ที่เกิดจากกระบวนการทับถมด้วยน้ำทะเล แผ่กระจายในพื้นที่เป็นป่าพรุและป่าชายเลนที่น้ำท่วมถึงในพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสงขลา ก็อาจนำวิธีการปรับปรุงสมบัติของดินทางเคมี เพื่อเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของดินให้มีความเหมาะสมกับงานทางวิศวกรรมและพิจารณาถึงแง่เศรษฐศาสตร์

ดังนั้นการจำกัดอุปสรรคและปัญหาที่เกิดขึ้นดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยการนำเทคนิควิธีการปรับปรุงสมบัติของดินเหนียวด้วยวิธีทางเคมีโดยการนำวัสดุอื่นมาผสม เพื่อให้เกิดวัสดุประสานจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างซิลิกาและอลูมินาที่เป็นองค์ประกอบหลักของดินเหนียว ซึ่งวัสดุที่นิยมใช้ในการผสม ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว และบรรดาวัสดุที่เป็นของเสียจากงานอุตสาหกรรม เช่น เถ้าลอยเขม่าซิลิกา (silica fume) ซึ่งเมื่อผสมวัสดุดังกล่าวในปริมาณที่เหมาะสมหรืออัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วก็จะทำให้ดินเหนียวมีพฤติกรรมทางด้านวิศวกรรมดีขึ้น สามารถเพิ่มกำลังอัดได้มากขึ้น เนื้อดินมีการประสานกันดีขึ้น ช่องว่างเนื้อดินลดลง เป็นผลให้อัตราการทรุดตัวลดลงด้วย สำหรับการวิจัยครั้งนี้ ได้นำเอาเถ้าสองชนิดมาผสมคือ เถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา ซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมเกษตร มาใช้ให้เกิดประโยชน์กับงานทางด้านวิศวกรรมทางและช่วยลดมลภาวะสิ่งแวดล้อมไปด้วย ดนุพลและจิรัชชาติ [1] ได้ศึกษาเถ้าไม้ยางพาราผสมในมอร์ตาร์ พบว่าเถ้าดังกล่าวมีปริมาณ CaO สูงถึง 58.17% ไม่ส่งผลต่อค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ แต่หากนำเถ้าลอยและเถ้าไม้ยางพาราผสมด้วยกัน [2] แทนที่ปูนซีเมนต์ในมอร์ตาร์ พบว่าให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นจากมอร์ตาร์ควบคุม อันเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan) ขึ้นในเถ้าลอยกับเถ้าไม้ยางพารา Zhu and Liu [3] ปรับปรุงคันทางทรายแบ่งด้วยเถ้าลอย ปูนขาว ปูนซีเมนต์และสารเติมจนกำลังอัด สมบัติเสถียรภาพน้ำ และความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ลดการหดตัวลงจนทำให้ดินคันทางแข็งแกร่ง

สมมาตรและคณะ [4] ได้ปรับสภาพดินพรุในจังหวัดสงขลาและสตูลด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จนดินสามารถใช้เป็นวัสดุคันทางได้ เช่นเดียวกับ Lee et al. [5] ได้เสนอสมการความสัมพันธ์กำลังอัดกับโมดูลัสของส่วนผสมดินเหนียวทะเลกับปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ Basha et al. [6] ได้ใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบปรับปรุงดินตักจันสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น และเสนอว่าปริมาณเหมาะสมคือ ปูนซีเมนต์ร้อยละ 6-8 และเถ้าแกลบร้อยละ 10-15 นอกจากนี้ยังมีการใช้วัสดุทั้งสองในการปรับสภาพและการแข็งตัวของดินปนเปื้อนตะกั่ว พบว่าลดสภาพการชะล้างตะกั่วจากดินที่บำบัดน้อยกว่าดินปรับสภาพด้วยปูนซีเมนต์ลำพัง แต่เถ้าแกลบแทนปูนซีเมนต์บางส่วนลดกำลังอัดลง [7] ดิษฐพรและคณะ [8] ได้ปรับปรุงดินเหนียวปากพองด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา พบว่าความหนาแน่นแห้งลดลง กำลังอัด การอัดตัวคายน้ำเพิ่มขึ้นที่ตัวอย่างดินผสมเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพาราอย่างละร้อยละ 10

2. การดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้

ดินเหนียวสงขลา (SC) เก็บตัวอย่างจากบริเวณสวนสมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ฯ ในเขตพื้นที่เทศบาลนครสงขลา ที่ความลึก 1.50-2.00 เมตร จากผิวดิน โดยเก็บตัวอย่างดินทั้งแบบเปลี่ยนสภาพและคงสภาพเถ้าแกลบ (RHA) เป็นเถ้ารวบรวมมาจากโรงสีข้าวประจำหมู่บ้าน อ.นาหม่อม จากการเผากำจัดแกลบจนแก่สีขาวขุ่น ส่วนเถ้าไม้ยางพารา (RWA) เป็นเถ้าที่ได้จากการนำเศษและปีกไม้เป็นเชื้อเพลิงไฟความชื้นเถ้าไม้ยางพาราแปรรูปของโรงงาน ที่ตำบลบ้านพรุ อ.หาดใหญ่ จังหวัดสงขลา แล้วจึงนำเอาเถ้าทั้งสองชนิดและร่อนคัดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (75 ไมครอน) ออกแบบอัตราส่วนผสมดินตัวอย่างทั้งหมด 32 สูตร โดยน้ำหนักแห้งของดิน (ตารางที่ 1) แต่กำหนดไว้ว่าแต่ละเถ้าทั้งสองที่เติมหรือเถ้าทั้งสองรวมกันต้องไม่เกินร้อยละ 50 ของดินเดิม

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ของตัวอย่างในอัตราส่วนงานวิจัยนี้

RHA (%)	RWA (%)	SC (%)	สัญลักษณ์
0	0	100	SC100
5	0	95	RHA5
10	0	90	RHA10
20	0	80	RHA20
30	0	70	RHA30
40	0	60	RHA40
50	0	50	RHA50
0	5	95	RWA5
0	10	90	RWA10
0	20	80	RWA20
0	30	70	RWA30

ตารางที่ 1 (ต่อ)

RHA (%)	RWA (%)	SC (%)	สัญลักษณ์
0	40	60	RWA40
0	50	50	RWA50
5	5	90	RHA5RWA5
5	15	80	RHA5RWA15
10	10	80	RHA10RWA10
15	5	80	RHA15RWA5
5	25	70	RHA5RWA25
10	20	70	RHA10RWA20
15	15	70	RHA15RWA15
20	10	70	RHA20RWA10
25	5	70	RHA25RWA5
5	35	60	RHA5RWA35
10	30	60	RHA10RWA30
20	20	60	RHA20RWA20
30	10	60	RHA30RWA10
35	5	60	RHA35RWA5
10	40	50	RHA10RWA40
20	30	50	RHA20RWA30
25	25	50	RHA25RWA25
30	20	50	RHA30RWA20
40	10	50	RHA40RWA10

2.2 วิธีทดสอบ

ทดสอบสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวสงขลาเดิม RHA และ RWA อันประกอบด้วย ค่าปริมาณความชื้น ความถ่วงจำเพาะ พร้อมทั้งส่งตรวจสารประกอบทางเคมีด้วยวิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence) รวมถึงตรวจหาองค์ประกอบแร่ที่เกิดขึ้นใหม่ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction) อันเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้น

สำหรับตัวอย่างดินหลังจากนำ RHA และ RWA มาผสมตามแต่ละอัตราส่วนที่กำหนดแล้วทดสอบหาสมบัติพื้นฐานและวิศวกรรมรวมถึงทางเคมีของทุกอัตราส่วน โดยหาค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าพิกัดแอดเทอร์เบิร์ต ทดสอบการบดอัดด้วยวิธีมาตรฐาน (Standard Proctor Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 698 เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) ทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 เตรียมก่อนทดสอบทุกอัตราส่วนผสมด้วยปริมาณความชื้นเหมาะสมตลอด บดอัดด้วยวิธีมาตรฐาน (Standard Proctor Test) ตามมาตรฐาน ASTM D698 เก็บตัวอย่างด้วยการหุ้มด้วยแผ่นพลาสติก

และห่อด้วยแผ่นอะลูมิเนียมอีกชั้นหนึ่งแล้วบรรจุลงในกล่องโฟม ปิดผนึกกล่องโฟมแล้วนำไปแช่ไว้ในอ่างน้ำเพื่อกันความชื้นคงไว้เป็นเวลา 1, 7, 14, 28 และ 56 วัน ส่วนการทดสอบอัตราส่วนแบกทานแคลิฟอร์เนีย (California Bearing Ratio, CBR) แบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked) ตามมาตรฐาน ASTM D 1883 ทดสอบเฉพาะดินสูตรที่ให้ค่า UCS สูงสุดเพียงสูตรเดียวและ SC สำหรับการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2435 ในการทดสอบใช้ดินตัวอย่างที่เป็นดินเดิมและดิน SC ที่ผ่านการบดอัด และดินสูตรผสมเข้าทั้งสองที่ให้ค่า UCS สูงสุดเพียงอัตราส่วนเดียวเท่านั้น และบดดินตัวอย่างไว้ที่อายุ 14 วัน

2.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ RHA และ RWA แบบกึ่งปริมาณ (ตารางที่ 1) RHA มีปริมาณของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันได้ประมาณร้อยละ 89.17 จำแนกตาม ASTM C 618 จัดอยู่ในสารปอซโซลานประเภท N สำหรับ SC มีปริมาณองค์ประกอบมากเช่นเดียวกับ RHA น้ำหนักที่สูญเสียหลังเผาของ RHA เท่ากับร้อยละ 5.13 อยู่ในเกณฑ์ไม่เกินร้อยละ 6 ตรงกันข้ามกับเถ้าไม้ยางพาราที่มีปริมาณ CaO สูงมาก (45.01%) และ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันได้ร้อยละ 1.15 เท่านั้น (ตารางที่ 1)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 คุณลักษณะของดินเดิม

SC เดิมมีค่ากำลังอัดค่อนข้างต่ำและมีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติค่อนข้างสูง (ตารางที่ 2) ทำให้พฤติกรรมของดินดังกล่าวไม่มีเหมาะกับงานทางด้านวิศวกรรม ก่อปรกักับ SC เกิดจากการทับถมของตะกอนแนวฝั่งทะเล จึงมีปริมาณคลอไรด์ สารอินทรีย์และซัลเฟตปนอยู่สูง ซึ่งส่งผลให้กำลังของดินลดลง [3] ซึ่งมีสมบัติทั้งทางกายภาพและเชิงกลไม่แตกต่างไปจากกับดินเหนียวปากพั้งมาก [8]

ตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีหลักของวัสดุผสมโดยวิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์

องค์ประกอบทางเคมี	SC (%)	RHA (%)	RWA (%)
SiO_2	52.95	86.45	0.87
Al_2O_3	14.52	1.34	0.08
Fe_2O_3	9.09	1.38	0.20
CaO	0.18	2.11	45.01
SO_3	5.92	0.47	5.57
Cl	0.52	0.20	0.77

ตารางที่ 3 (ต่อ)

องค์ประกอบทางเคมี	SC (%)	RHA (%)	RWA (%)
K ₂ O	1.82	1.06	12.45
P ₂ O ₅	-	0.85	1.73
TiO ₂	1.44	0.12	-
MnO ₂	-	0.44	1.08
MgO	-	0.35	3.43
LOI	-	5.13	28.58

ตารางที่ 2 สมบัติทางวิศวกรรมและสิ่งเจือปนในดินเหนียวสงขลา

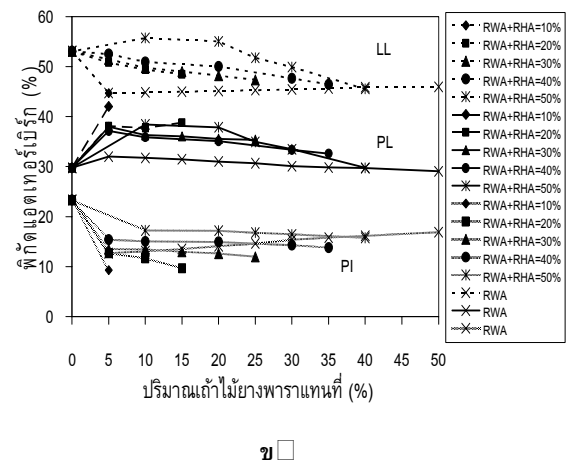
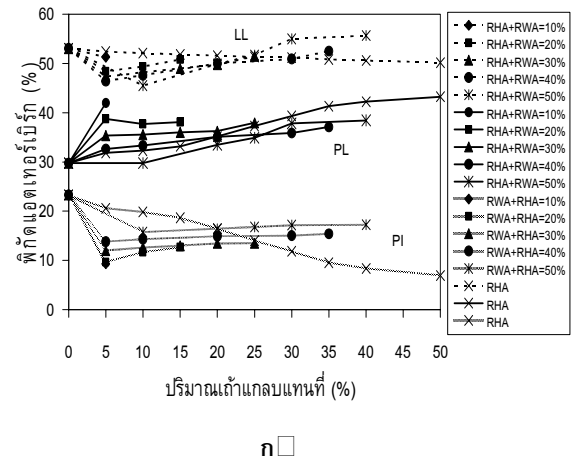
สมบัติของดินเหนียวสงขลา	ปริมาณ
ปริมาณน้ำตามธรรมชาติ, %	76.44
พิกัดเหลว (Liquid Limit -LL), %	53.37
พิกัดพลาสติก (Plastic Limit -PL), %	28.36
ดัชนีพลาสติก (Plastic Index -PI), %	25.01
ความถ่วงจำเพาะ (G _s)	2.64
หน่วยน้ำหนักทั้งหมด (Total Unit Weight -γ _t)	1.491
กำลังอัดแกนเดี่ยว (UCS) กิโลกรัม/ซม. ²	0.16
ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)	3.15
คลอไรด์ (Chloride) กรัม/กิโลกรัม	3.50
สสารอินทรีย์ (Organic Matter), กรัม/กิโลกรัม	38.99
ซัลเฟต (Sulphate), กรัม/กิโลกรัม	2.31

3.2 พิกัดแอดเทอร์เบอร์ก

ผลการทดสอบดินหลังจากผสมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา ในอัตราส่วนต่างๆ กัน ซึ่งในกรณีผสมเถ้าแกลบในอัตราส่วนที่เพิ่มเป็นผลให้ทั้งค่า LL, PL และ PI เพิ่มขึ้นทั้งหมด ส่วนกรณีดินผสมเถ้าไม้ยางพาราส่งผลตรงกันข้ามคือให้ค่า LL, PL และ PI ลดลงทั้งหมดเช่นกัน และในกรณีผสมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราซึ่งเมื่อผสมเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า LL, PL เพิ่มขึ้น รวมไปถึงค่า PI เพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 1 ก

ในกรณีดินผสมเถ้าไม้ยางพาราเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ค่า LL, PL ลดลง และส่งผลให้ค่า PI ลดลงด้วย (รูปที่ 1 ข) ซึ่งสอดคล้องกับที่ Terrel et al. [9] กล่าวว่า การผสมปูนขาวช่วยให้ค่า PI ของดินลดลง แต่จะช่วยเพิ่มค่าความสามารถในการเทได้ดีขึ้น (Workability)

ผลดังกล่าวนี้เช่นเดียวกับงานของ Ali et al. [10] ได้ศึกษาปฏิกิริยาทางเคมีในการเติมเถ้าแกลบในดิน พบว่าสมบัติทางธรณีเทคนิคของดินปรับปรุงเปลี่ยนไปในทางที่ดีขึ้น

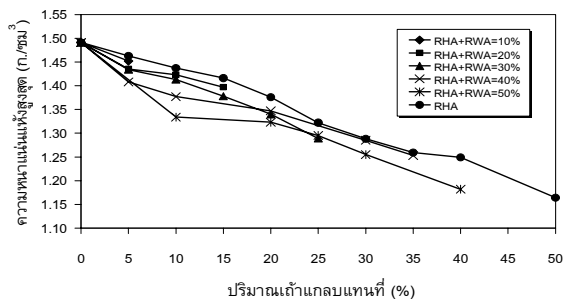


รูปที่ 1 ผลกระทบของพิกัดแอดเทอร์เบอร์กของดินเหนียวสงขลาจาก ก)เถ้าแกลบ และ ข)เถ้าไม้ยางพารา

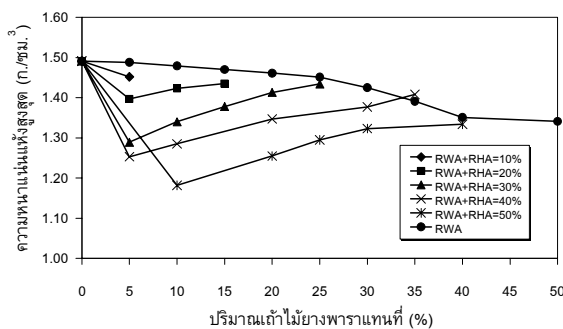
3.3 การบดอัด

พฤติกรรมหลังการบดอัดดินผสมเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา ในอัตราส่วนต่างๆ กัน โดยที่ปริมาณของเถ้าทั้งสองเพิ่มแต่ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งมีค่าลดลง (รูปที่ 2) และเมื่อพิจารณาถึงผลค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม ปรากฏว่ามีค่าแปรผันตามปริมาณร้อยละที่เพิ่มขึ้นของลำพังเถ้าทั้งสองและที่ผสมกัน (รูปที่ 3) มีความเห็นว่าเถ้าช่วยลดปริมาณความชื้นตามธรรมชาติของดินเดิมซึ่งสอดคล้องกับผลศึกษาของ Yarbasi et al. [11] ได้ทดสอบวัฏจักรความคงทนต่อความเย็นและละลายของบดอัดดินเหนียวที่ใช้สารเติมจากของเสียจากอุตสาหกรรม ได้แก่ เซเมนต์ซีเมนต์, เถ้าลอยปูนขาว และโคลนสีแดง ได้ช่วยเพิ่มความคงทนต่อความเย็นและละลายสามารถประยุกต์ในงานก่อสร้างถนนและงานดินต่างๆ

ซึ่งจะเห็นได้ว่าลำพังปริมาณน้ำที่เหมาะสมนั้นไม่สามารถช่วยทำให้การปรับปรุงดินดีขึ้นมาจนอันเป็นผลให้ได้กำลังที่ต้องการได้ แต่ต้องคำนึงรวมไปถึงอิทธิพลของอัตราส่วนเข้ากับดินด้วย เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Lee et al. [5]

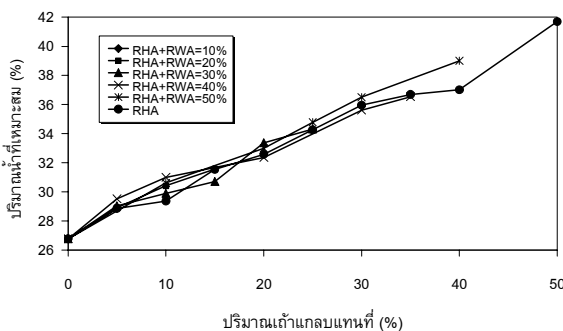


ก □

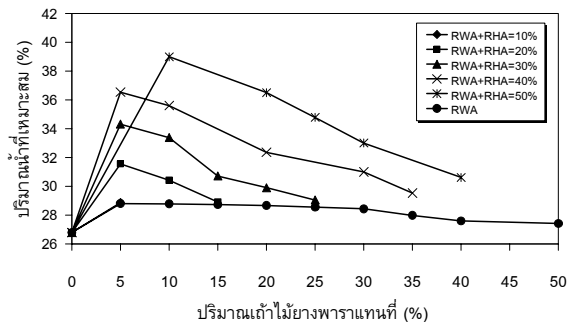


ข □

รูปที่ 2 ผลกระทบของความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินเหนียวสงขลมาจาก ก) ถ้ำกลบ และ ข) ถ้ำไม้ยางพารา



ก □

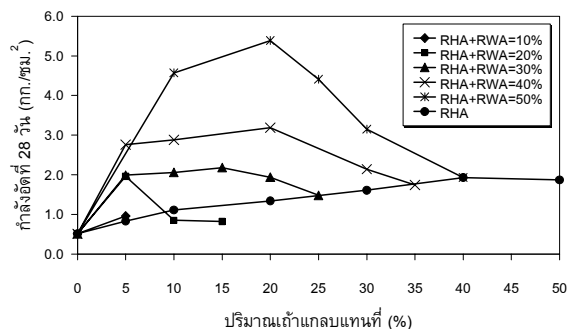


ข □

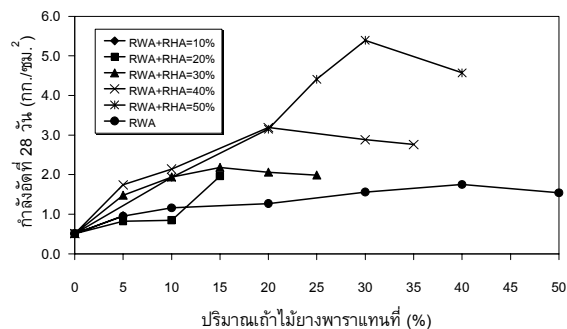
รูปที่ 3 ผลกระทบของปริมาณน้ำที่เหมาะสมของดินเหนียวสงขลมาจาก ก) ถ้ำกลบ และ ข) ถ้ำไม้ยางพารา

3.4 กำลังอัดแกนเดียว

กำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน ปรากฏว่าการผสม RHA (รูปที่ 4 ก) และ RWA (รูปที่ 4 ข) ในอัตราส่วนต่างๆ กัน มีผลต่อการเพิ่มค่ากำลังอัดแกนเดียว อย่างต่อเนื่องและสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่ออัตราส่วนผสมถ้ำทั้งสองมากขึ้น ได้ส่งผลให้ดินปรับปรุงจากถ้ำทั้งสองมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับ Basha et al. [6]



ก □

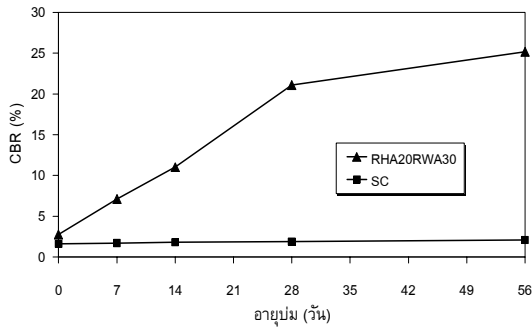


ข □

รูปที่ 4 ผลกระทบของกำลังอัดบ่มที่ 28 วัน ของดินเหนียวสงขลมาจาก ก) ถ้ำกลบ และ ข) ถ้ำไม้ยางพารา

3.5 อัตราส่วนแบกทานแคลิฟอร์เนีย

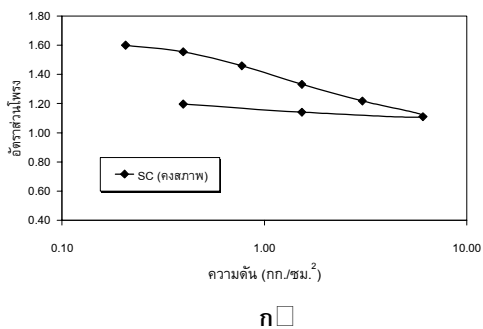
ค่าอัตราส่วนแรงแบกทานแคลิฟอร์เนีย (CBR) ของตัวอย่างดินสูตร RHA20RWA30 ที่มีกำลังอัดสูงสุด ปรากฏว่าได้ CBR เท่ากับ 21% ที่ 28 วัน ซึ่งมากกว่าที่คูณกว่า SC มีค่าเพียง 1.6% เท่านั้น (รูปที่ 5) ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะปรับปรุงสมบัติของดินเหนียวสงขลาเดิมเพื่อให้สามารถใช้งานเป็นวัสดุคั่นทางได้ แต่หากให้ตัวปรับสภาพมีประสิทธิภาพสูงต้องใช้เวลา 7 วันขึ้นไป



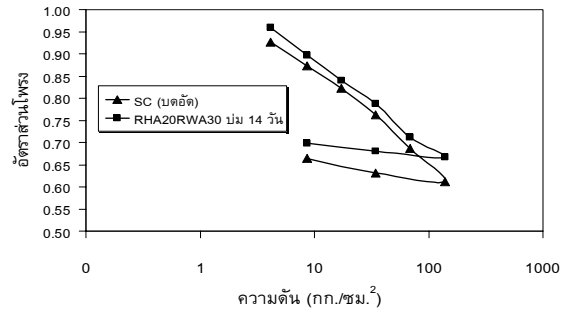
รูปที่ 5 อิทธิพลของอายุบ่มที่มีต่อค่า CBR ของดิน RHA20RWA30

3.6 การอัดตัวคายน้ำ

ตัวอย่างดินสูตร RHA20RWA30 สามารถช่วยลดอัตราการยุบตัว และเพิ่มค่า P_c ให้สูงขึ้นกรณีดินคงสภาพ, ดินบดอัดเพิ่มขึ้น 5920%, 122.96% ตามลำดับ โดยได้แสดงผลการทดสอบดังในรูปที่ 6 ซึ่งมีค่าคงตัวของการยุบอัดตัว (Compressibility Parameter) ดังตารางที่ 5 ซึ่งให้ผลทำนองเดียวกับงานศึกษาของ Gurtug and Sridharan [12]



รูปที่ 6



รูปที่ 7

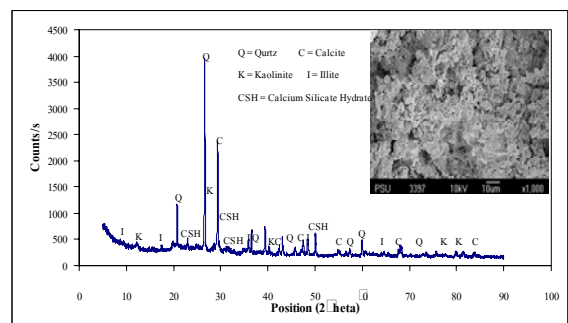
รูปที่ 6 พฤติกรรมของค่าอัตราส่วนโพรงของดินเหนียวสงขลา ก) คงสภาพ ข) บดอัด และ ค) ดินสูตร RHA20RWA30 ที่ 14 วัน

ตารางที่ 5 ค่าคงตัวของสภาพยุบอัดตัวคายน้ำ

Compressibility Parameter	ดินเหนียวสงขลา (SC)		
	คงสภาพ	บดอัด	RHA20RWA30
P_c (ksc)	0.50	13.50	30.10
C_c	0.271	0.477	0.500
C_r	0.0625	0.056	0.0714

3.7 องค์ประกอบแร่และโครงสร้างจุลภาค

ผลการตรวจปฏิบัติการทางเคมีที่เกิดจากการผสมเข้าทั้งสอง ปรากฏว่าพบแร่ CSH เกิดขึ้นตั้งแต่อายุบ่มที่ 7, 14, 28 (รูปที่ 7) และ 56 วัน มีค่าร้อยละ 8.79, 10.68, 15.65 และ 16.03 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ และมีค่าแนวโน้มคงที่ตั้งแต่อายุ 28 วัน การตรวจสอบโครงสร้างด้วย SEM ก็ยืนยันว่าโครงสร้างดินปรากฏมีโครงสร้างใหม่คือ ช่องว่างลดลงตามอายุการบ่ม ดังภาพเล็กในรูปที่ 7



รูปที่ 7 องค์ประกอบของแร่และโครงสร้างจุลภาคของดินสูตร RHA20RWA30 ที่อายุบ่ม 28 วัน

7 เช่นเดียวกับผลศึกษา Basha et al. [6] ดินที่ปรับสภาพด้วย
 ๒ ๓ ๔ ๕ ๖ ๗ ๘ ๙ ๑๐ ๑๑ ๑๒ ๑๓ ๑๔ ๑๕ ๑๖ ๑๗ ๑๘ ๑๙ ๒๐ ๒๑ ๒๒ ๒๓ ๒๔ ๒๕ ๒๖ ๒๗ ๒๘ ๒๙ ๓๐ ๓๑ ๓๒ ๓๓ ๓๔ ๓๕ ๓๖ ๓๗ ๓๘ ๓๙ ๔๐ ๔๑ ๔๒ ๔๓ ๔๔ ๔๕ ๔๖ ๔๗ ๔๘ ๔๙ ๕๐ ๕๑ ๕๒ ๕๓ ๕๔ ๕๕ ๕๖ ๕๗ ๕๘ ๕๙ ๖๐ ๖๑ ๖๒ ๖๓ ๖๔ ๖๕ ๖๖ ๖๗ ๖๘ ๖๙ ๗๐ ๗๑ ๗๒ ๗๓ ๗๔ ๗๕ ๗๖ ๗๗ ๗๘ ๗๙ ๘๐ ๘๑ ๘๒ ๘๓ ๘๔ ๘๕ ๘๖ ๘๗ ๘๘ ๘๙ ๙๐ ๙๑ ๙๒ ๙๓ ๙๔ ๙๕ ๙๖ ๙๗ ๙๘ ๙๙ ๑๐๐ ๑๐๑ ๑๐๒ ๑๐๓ ๑๐๔ ๑๐๕ ๑๐๖ ๑๐๗ ๑๐๘ ๑๐๙ ๑๑๐ ๑๑๑ ๑๑๒ ๑๑๓ ๑๑๔ ๑๑๕ ๑๑๖ ๑๑๗ ๑๑๘ ๑๑๙ ๑๒๐ ๑๒๑ ๑๒๒ ๑๒๓ ๑๒๔ ๑๒๕ ๑๒๖ ๑๒๗ ๑๒๘ ๑๒๙ ๑๓๐ ๑๓๑ ๑๓๒ ๑๓๓ ๑๓๔ ๑๓๕ ๑๓๖ ๑๓๗ ๑๓๘ ๑๓๙ ๑๔๐ ๑๔๑ ๑๔๒ ๑๔๓ ๑๔๔ ๑๔๕ ๑๔๖ ๑๔๗ ๑๔๘ ๑๔๙ ๑๕๐ ๑๕๑ ๑๕๒ ๑๕๓ ๑๕๔ ๑๕๕ ๑๕๖ ๑๕๗ ๑๕๘ ๑๕๙ ๑๖๐ ๑๖๑ ๑๖๒ ๑๖๓ ๑๖๔ ๑๖๕ ๑๖๖ ๑๖๗ ๑๖๘ ๑๖๙ ๑๗๐ ๑๗๑ ๑๗๒ ๑๗๓ ๑๗๔ ๑๗๕ ๑๗๖ ๑๗๗ ๑๗๘ ๑๗๙ ๑๘๐ ๑๘๑ ๑๘๒ ๑๘๓ ๑๘๔ ๑๘๕ ๑๘๖ ๑๘๗ ๑๘๘ ๑๘๙ ๑๙๐ ๑๙๑ ๑๙๒ ๑๙๓ ๑๙๔ ๑๙๕ ๑๙๖ ๑๙๗ ๑๙๘ ๑๙๙ ๒๐๐ ๒๐๑ ๒๐๒ ๒๐๓ ๒๐๔ ๒๐๕ ๒๐๖ ๒๐๗ ๒๐๘ ๒๐๙ ๒๑๐ ๒๑๑ ๒๑๒ ๒๑๓ ๒๑๔ ๒๑๕ ๒๑๖ ๒๑๗ ๒๑๘ ๒๑๙ ๒๒๐ ๒๒๑ ๒๒๒ ๒๒๓ ๒๒๔ ๒๒๕ ๒๒๖ ๒๒๗ ๒๒๘ ๒๒๙ ๒๓๐ ๒๓๑ ๒๓๒ ๒๓๓ ๒๓๔ ๒๓๕ ๒๓๖ ๒๓๗ ๒๓๘ ๒๓๙ ๒๔๐ ๒๔๑ ๒๔๒ ๒๔๓ ๒๔๔ ๒๔๕ ๒๔๖ ๒๔๗ ๒๔๘ ๒๔๙ ๒๕๐ ๒๕๑ ๒๕๒ ๒๕๓ ๒๕๔ ๒๕๕ ๒๕๖ ๒๕๗ ๒๕๘ ๒๕๙ ๒๖๐ ๒๖๑ ๒๖๒ ๒๖๓ ๒๖๔ ๒๖๕ ๒๖๖ ๒๖๗ ๒๖๘ ๒๖๙ ๒๗๐ ๒๗๑ ๒๗๒ ๒๗๓ ๒๗๔ ๒๗๕ ๒๗๖ ๒๗๗ ๒๗๘ ๒๗๙ ๒๘๐ ๒๘๑ ๒๘๒ ๒๘๓ ๒๘๔ ๒๘๕ ๒๘๖ ๒๘๗ ๒๘๘ ๒๘๙ ๒๙๐ ๒๙๑ ๒๙๒ ๒๙๓ ๒๙๔ ๒๙๕ ๒๙๖ ๒๙๗ ๒๙๘ ๒๙๙ ๓๐๐ ๓๐๑ ๓๐๒ ๓๐๓ ๓๐๔ ๓๐๕ ๓๐๖ ๓๐๗ ๓๐๘ ๓๐๙ ๓๑๐ ๓๑๑ ๓๑๒ ๓๑๓ ๓๑๔ ๓๑๕ ๓๑๖ ๓๑๗ ๓๑๘ ๓๑๙ ๓๒๐ ๓๒๑ ๓๒๒ ๓๒๓ ๓๒๔ ๓๒๕ ๓๒๖ ๓๒๗ ๓๒๘ ๓๒๙ ๓๓๐ ๓๓๑ ๓๓๒ ๓๓๓ ๓๓๔ ๓๓๕ ๓๓๖ ๓๓๗ ๓๓๘ ๓๓๙ ๓๔๐ ๓๔๑ ๓๔๒ ๓๔๓ ๓๔๔ ๓๔๕ ๓๔๖ ๓๔๗ ๓๔๘ ๓๔๙ ๓๕๐ ๓๕๑ ๓๕๒ ๓๕๓ ๓๕๔ ๓๕๕ ๓๕๖ ๓๕๗ ๓๕๘ ๓๕๙ ๓๖๐ ๓๖๑ ๓๖๒ ๓๖๓ ๓๖๔ ๓๖๕ ๓๖๖ ๓๖๗ ๓๖๘ ๓๖๙ ๓๗๐ ๓๗๑ ๓๗๒ ๓๗๓ ๓๗๔ ๓๗๕ ๓๗๖ ๓๗๗ ๓๗๘ ๓๗๙ ๓๘๐ ๓๘๑ ๓๘๒ ๓๘๓ ๓๘๔ ๓๘๕ ๓๘๖ ๓๘๗ ๓๘๘ ๓๘๙ ๓๙๐ ๓๙๑ ๓๙๒ ๓๙๓ ๓๙๔ ๓๙๕ ๓๙๖ ๓๙๗ ๓๙๘ ๓๙๙ ๔๐๐ ๔๐๑ ๔๐๒ ๔๐๓ ๔๐๔ ๔๐๕ ๔๐๖ ๔๐๗ ๔๐๘ ๔๐๙ ๔๑๐ ๔๑๑ ๔๑๒ ๔๑๓ ๔๑๔ ๔๑๕ ๔๑๖ ๔๑๗ ๔๑๘ ๔๑๙ ๔๒๐ ๔๒๑ ๔๒๒ ๔๒๓ ๔๒๔ ๔๒๕ ๔๒๖ ๔๒๗ ๔๒๘ ๔๒๙ ๔๓๐ ๔๓๑ ๔๓๒ ๔๓๓ ๔๓๔ ๔๓๕ ๔๓๖ ๔๓๗ ๔๓๘ ๔๓๙ ๔๔๐ ๔๔๑ ๔๔๒ ๔๔๓ ๔๔๔ ๔๔๕ ๔๔๖ ๔๔๗ ๔๔๘ ๔๔๙ ๔๕๐ ๔๕๑ ๔๕๒ ๔๕๓ ๔๕๔ ๔๕๕ ๔๕๖ ๔๕๗ ๔๕๘ ๔๕๙ ๔๖๐ ๔๖๑ ๔๖๒ ๔๖๓ ๔๖๔ ๔๖๕ ๔๖๖ ๔๖๗ ๔๖๘ ๔๖๙ ๔๗๐ ๔๗๑ ๔๗๒ ๔๗๓ ๔๗๔ ๔๗๕ ๔๗๖ ๔๗๗ ๔๗๘ ๔๗๙ ๔๘๐ ๔๘๑ ๔๘๒ ๔๘๓ ๔๘๔ ๔๘๕ ๔๘๖ ๔๘๗ ๔๘๘ ๔๘๙ ๔๙๐ ๔๙๑ ๔๙๒ ๔๙๓ ๔๙๔ ๔๙๕ ๔๙๖ ๔๙๗ ๔๙๘ ๔๙๙ ๕๐๐ ๕๐๑ ๕๐๒ ๕๐๓ ๕๐๔ ๕๐๕ ๕๐๖ ๕๐๗ ๕๐๘ ๕๐๙ ๕๑๐ ๕๑๑ ๕๑๒ ๕๑๓ ๕๑๔ ๕๑๕ ๕๑๖ ๕๑๗ ๕๑๘ ๕๑๙ ๕๒๐ ๕๒๑ ๕๒๒ ๕๒๓ ๕๒๔ ๕๒๕ ๕๒๖ ๕๒๗ ๕๒๘ ๕๒๙ ๕๓๐ ๕๓๑ ๕๓๒ ๕๓๓ ๕๓๔ ๕๓๕ ๕๓๖ ๕๓๗ ๕๓๘ ๕๓๙ ๕๔๐ ๕๔๑ ๕๔๒ ๕๔๓ ๕๔๔ ๕๔๕ ๕๔๖ ๕๔๗ ๕๔๘ ๕๔๙ ๕๕๐ ๕๕๑ ๕๕๒ ๕๕๓ ๕๕๔ ๕๕๕ ๕๕๖ ๕๕๗ ๕๕๘ ๕๕๙ ๕๖๐ ๕๖๑ ๕๖๒ ๕๖๓ ๕๖๔ ๕๖๕ ๕๖๖ ๕๖๗ ๕๖๘ ๕๖๙ ๕๗๐ ๕๗๑ ๕๗๒ ๕๗๓ ๕๗๔ ๕๗๕ ๕๗๖ ๕๗๗ ๕๗๘ ๕๗๙ ๕๘๐ ๕๘๑ ๕๘๒ ๕๘๓ ๕๘๔ ๕๘๕ ๕๘๖ ๕๘๗ ๕๘๘ ๕๘๙ ๕๙๐ ๕๙๑ ๕๙๒ ๕๙๓ ๕๙๔ ๕๙๕ ๕๙๖ ๕๙๗ ๕๙๘ ๕๙๙ ๖๐๐ ๖๐๑ ๖๐๒ ๖๐๓ ๖๐๔ ๖๐๕ ๖๐๖ ๖๐๗ ๖๐๘ ๖๐๙ ๖๑๐ ๖๑๑ ๖๑๒ ๖๑๓ ๖๑๔ ๖๑๕ ๖๑๖ ๖๑๗ ๖๑๘ ๖๑๙ ๖๒๐ ๖๒๑ ๖๒๒ ๖๒๓ ๖๒๔ ๖๒๕ ๖๒๖ ๖๒๗ ๖๒๘ ๖๒๙ ๖๓๐ ๖๓๑ ๖๓๒ ๖๓๓ ๖๓๔ ๖๓๕ ๖๓๖ ๖๓๗ ๖๓๘ ๖๓๙ ๖๔๐ ๖๔๑ ๖๔๒ ๖๔๓ ๖๔๔ ๖๔๕ ๖๔๖ ๖๔๗ ๖๔๘ ๖๔๙ ๖๕๐ ๖๕๑ ๖๕๒ ๖๕๓ ๖๕๔ ๖๕๕ ๖๕๖ ๖๕๗ ๖๕๘ ๖๕๙ ๖๖๐ ๖๖๑ ๖๖๒ ๖๖๓ ๖๖๔ ๖๖๕ ๖๖๖ ๖๖๗ ๖๖๘ ๖๖๙ ๖๗๐ ๖๗๑ ๖๗๒ ๖๗๓ ๖๗๔ ๖๗๕ ๖๗๖ ๖๗๗ ๖๗๘ ๖๗๙ ๖๘๐ ๖๘๑ ๖๘๒ ๖๘๓ ๖๘๔ ๖๘๕ ๖๘๖ ๖๘๗ ๖๘๘ ๖๘๙ ๖๙๐ ๖๙๑ ๖๙๒ ๖๙๓ ๖๙๔ ๖๙๕ ๖๙๖ ๖๙๗ ๖๙๘ ๖๙๙ ๗๐๐ ๗๐๑ ๗๐๒ ๗๐๓ ๗๐๔ ๗๐๕ ๗๐๖ ๗๐๗ ๗๐๘ ๗๐๙ ๗๑๐ ๗๑๑ ๗๑๒ ๗๑๓ ๗๑๔ ๗๑๕ ๗๑๖ ๗๑๗ ๗๑๘ ๗๑๙ ๗๒๐ ๗๒๑ ๗๒๒ ๗๒๓ ๗๒๔ ๗๒๕ ๗๒๖ ๗๒๗ ๗๒๘ ๗๒๙ ๗๓๐ ๗๓๑ ๗๓๒ ๗๓๓ ๗๓๔ ๗๓๕ ๗๓๖ ๗๓๗ ๗๓๘ ๗๓๙ ๗๔๐ ๗๔๑ ๗๔๒ ๗๔๓ ๗๔๔ ๗๔๕ ๗๔๖ ๗๔๗ ๗๔๘ ๗๔๙ ๗๕๐ ๗๕๑ ๗๕๒ ๗๕๓ ๗๕๔ ๗๕๕ ๗๕๖ ๗๕๗ ๗๕๘ ๗๕๙ ๗๖๐ ๗๖๑ ๗๖๒ ๗๖๓ ๗๖๔ ๗๖๕ ๗๖๖ ๗๖๗ ๗๖๘ ๗๖๙ ๗๗๐ ๗๗๑ ๗๗๒ ๗๗๓ ๗๗๔ ๗๗๕ ๗๗๖ ๗๗๗ ๗๗๘ ๗๗๙ ๗๘๐ ๗๘๑ ๗๘๒ ๗๘๓ ๗๘๔ ๗๘๕ ๗๘๖ ๗๘๗ ๗๘๘ ๗๘๙ ๗๙๐ ๗๙๑ ๗๙๒ ๗๙๓ ๗๙๔ ๗๙๕ ๗๙๖ ๗๙๗ ๗๙๘ ๗๙๙ ๘๐๐ ๘๐๑ ๘๐๒ ๘๐๓ ๘๐๔ ๘๐๕ ๘๐๖ ๘๐๗ ๘๐๘ ๘๐๙ ๘๑๐ ๘๑๑ ๘๑๒ ๘๑๓ ๘๑๔ ๘๑๕ ๘๑๖ ๘๑๗ ๘๑๘ ๘๑๙ ๘๒๐ ๘๒๑ ๘๒๒ ๘๒๓ ๘๒๔ ๘๒๕ ๘๒๖ ๘๒๗ ๘๒๘ ๘๒๙ ๘๓๐ ๘๓๑ ๘๓๒ ๘๓๓ ๘๓๔ ๘๓๕ ๘๓๖ ๘๓๗ ๘๓๘ ๘๓๙ ๘๔๐ ๘๔๑ ๘๔๒ ๘๔๓ ๘๔๔ ๘๔๕ ๘๔๖ ๘๔๗ ๘๔๘ ๘๔๙ ๘๕๐ ๘๕๑ ๘๕๒ ๘๕๓ ๘๕๔ ๘๕๕ ๘๕๖ ๘๕๗ ๘๕๘ ๘๕๙ ๘๖๐ ๘๖๑ ๘๖๒ ๘๖๓ ๘๖๔ ๘๖๕ ๘๖๖ ๘๖๗ ๘๖๘ ๘๖๙ ๘๗๐ ๘๗๑ ๘๗๒ ๘๗๓ ๘๗๔ ๘๗๕ ๘๗๖ ๘๗๗ ๘๗๘ ๘๗๙ ๘๘๐ ๘๘๑ ๘๘๒ ๘๘๓ ๘๘๔ ๘๘๕ ๘๘๖ ๘๘๗ ๘๘๘ ๘๘๙ ๘๙๐ ๘๙๑ ๘๙๒ ๘๙๓ ๘๙๔ ๘๙๕ ๘๙๖ ๘๙๗ ๘๙๘ ๘๙๙ ๙๐๐ ๙๐๑ ๙๐๒ ๙๐๓ ๙๐๔ ๙๐๕ ๙๐๖ ๙๐๗ ๙๐๘ ๙๐๙ ๙๑๐ ๙๑๑ ๙๑๒ ๙๑๓ ๙๑๔ ๙๑๕ ๙๑๖ ๙๑๗ ๙๑๘ ๙๑๙ ๙๒๐ ๙๒๑ ๙๒๒ ๙๒๓ ๙๒๔ ๙๒๕ ๙๒๖ ๙๒๗ ๙๒๘ ๙๒๙ ๙๓๐ ๙๓๑ ๙๓๒ ๙๓๓ ๙๓๔ ๙๓๕ ๙๓๖ ๙๓๗ ๙๓๘ ๙๓๙ ๙๔๐ ๙๔๑ ๙๔๒ ๙๔๓ ๙๔๔ ๙๔๕ ๙๔๖ ๙๔๗ ๙๔๘ ๙๔๙ ๙๕๐ ๙๕๑ ๙๕๒ ๙๕๓ ๙๕๔ ๙๕๕ ๙๕๖ ๙๕๗ ๙๕๘ ๙๕๙ ๙๖๐ ๙๖๑ ๙๖๒ ๙๖๓ ๙๖๔ ๙๖๕ ๙๖๖ ๙๖๗ ๙๖๘ ๙๖๙ ๙๗๐ ๙๗๑ ๙๗๒ ๙๗๓ ๙๗๔ ๙๗๕ ๙๗๖ ๙๗๗ ๙๗๘ ๙๗๙ ๙๘๐ ๙๘๑ ๙๘๒ ๙๘๓ ๙๘๔ ๙๘๕ ๙๘๖ ๙๘๗ ๙๘๘ ๙๘๙ ๙๙๐ ๙๙๑ ๙๙๒ ๙๙๓ ๙๙๔ ๙๙๕ ๙๙๖ ๙๙๗ ๙๙๘ ๙๙๙ ๑๐๐๐

4. สรุปผล

จากผลการศึกษาพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินเหนียว
 สงขลาหลังผสมกับเถ้าทั้งสองชนิดได้ผลสรุปดังนี้

1. การผสมเถ้าแกลบและเถ้าไม้พาราในอัตราส่วนต่างกัน
 ทำให้การบดอัดง่ายขึ้นเพราะค่าดัชนีพลาสติก (PI) ลดลง ปริมาณ
 น้ำเหมาะสมเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งลดลง

2. การนำเถ้าทั้งสองผสมในอัตราส่วนต่างๆ กัน มีบทบาท
 ต่อการพัฒนาค่าลึงอัดและค่า CBR ค่าลึงอัดสูงสุดที่ผสมเถ้า
 แกลบร้อยละ 20 และเถ้าไม้พารา 30 มีค่าเพิ่มจากดินเดิม
 ร้อยละ 956 อายุการบ่มได้ช่วยเช่นกัน

3. ดินผสมเถ้าแกลบและเถ้าไม้พารา สามารถทำให้เกิด
 ปฏิริยาไฮเดรชันและปฏิริยาปอซโซลานได้ โดยเกิดเป็นสารประกอบ
 CSH ซึ่งมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามอายุการบ่ม

เถ้าทั้งสองปรับสภาพดินให้ใช้งานก่อสร้างถนนและประยุกต์
 งานดินต่างๆ ได้ดีและสามารถลดค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงลงมาก

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 งบประมาณ ประจำปี 2548 สำหรับให้ทุนสนับสนุน
 งานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ดนุพล ตันนโยภาส และจิรัชชาติ เจ้าสินเจริญ. 2543. ปูน
 ผสมเถ้าลอยและซีลี้อยไม้พารา วารสารสงขลานครินทร์
 ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 22.หน้า 489-500.
- [2] ดนุพล ตันนโยภาส ชัดเจน ฤดีวรุฬห์ และอำพล กิติโชติ.
 2546. ผลกระทบจากการเติมเถ้าลอย และเถ้าซีลี้อยไม้
 พาราที่มีต่อมอร์ตาร์ปอร์แลนด์ซีเมนต์. การประชุมทาง
 วิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 1 14-16 พ.ค. 2546 เชื้อน
 ศรีนครินทร์ จังหวัดกาญจนบุรี 6 หน้า
- [3] Zhu, Z.-D. and Liu, S.-Y. 2008. Utilization of a New
 Soil Stabilizer for Silt Subgrade. *Engineering
 Geology*, 97(): 192–198.
- [4] สมมาตร สวัสดิ์ สรวุฑ จิตงาม ดนุพล ตันนโยภาส และ
 พิพัฒน์ ทองฉิม. 2550. การปรับปรุงดินคันทางอ่อนโดย
 การผสมซีเมนต์กรณศึกษาจังหวัดสงขลา. การประชุม

วิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12 โรงแรม
 อมรินทร์ลากูน พิษณุโลก 6 หน้า

- [5] Lee, F.-H., Lee, Y., Chew, S.-H. and Yong K.-Y. 2005.
 Strength and Modulus of Marine Clay-Cement Mixes.
*Journal of Geotechnical and Geoenvironmental
 Engineering*, 131(2): 178–186.
- [6] Basha, E.A, Hashim, R., Mahmud, H.A. and Muntohar,
 S.A. 2005. Stabilization of Residual Soil with Rice
 Husk Ash and Cement, *Construction and Building
 Material*, 19(6): 448-453.
- [7] Yin, C.-Y., Mahmud, H.B. and Shaaban, Md.G. 2006.
 Stabilization/Solidification of Lead-Contaminated Soil
 Using Cement and Rice Husk Ash. *Journal of
 Hazardous Materials B*, 137(3): 1758–1764.
- [8] ดิษฐพร แก้วมูณีโชค ดนุพล ตันนโยภาส และพิพัฒน์
 ทองฉิม. 2551. คุณลักษณะพฤติกรรมของดินเหนียวปาก
 พันธ์ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้
 พาราบดอัด การประชุมใหญ่สามัญประจำปี 2550
 สมาคมทางหลวงแห่งประเทศไทย กรมทางหลวง 1
 เมษายน 2551 7 หน้า
- [9] Terrel, R.L., Barenberg, E.J., Mitchell, J.M. and Thomson,
 M.R. 1979. Soil Stabilization in Pavement Structures
 A User's Manual Mixture Design Consideration, Vol.
 2, Washington, D.C., US.
- [10] Ali, F.H., Adnan, A. and Choy, C.K. 1992. Geotechnical
 Properties of a Chemically Stabilised Soil from
 Malaysia with Rice Husk Ash an Additive. *Int. J.
 Geotech Geol Engng.*, 10(2): 117–134.
- [11] Yarbasi, N., Kalkan, E. and Akbulut, S. 2007. Modification of
 the Geotechnical Properties, as Influenced by
 Freeze–thaw, of Granular Soils with Waste Additives.
Cold Regions Science and Technology 48(): 44–54.
- [12] Gurtug, Y. and Sridharan, A. 2002. Prediction of Compaction
 Characteristics of Fine-Grained Soils. *Geotechnique*,
 52(10): 761-763.
- [13] Misra, A., Biswas, D. and Upadhyaya, S. 2005. Physico-
 Mechanical Behavior of Self-Cementing Class C Fly
 Ash–Clay Mixtures. *Fuel*, 84(11); 1410–1422.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายอรุณ สุวรรณสุนทร

รหัสประจำตัวนักศึกษา 4812085

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล	2540
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	2550

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

ครู คศ.1 วิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

อรุณ สุวรรณสุนทร, ดนุพล ตันนโยภาสและพิพัฒน์ ทองฉิม. (2552). การปรับปรุงคุณสมบัติทาง
ธรณีเทคนิคของดินเหนียวสงขลาด้วยเถ้าจากของเสียอุตสาหกรรมการเกษตร. การประชุมวิชาการ
วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, 13-15 พฤษภาคม 2552. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
จังหวัดนครราชสีมา. หน้า 273–279.

อรุณ สุวรรณสุนทร, ดนุพล ตันนโยภาสและพิพัฒน์ ทองฉิม. (2552). ผลกระทบของการผสมตัว
ปรับสภาพเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารามีต่อดินเหนียวสงขลาสำหรับวัสดุกันทาง. การประชุม
วิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7. คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 21-22 พฤษภาคม 2552. จังหวัดสงขลา. หน้า 21-26.