อิทธิพลของน้ำยางพาราต่อกำลังอัดและความทนทานต่อสภาวะเปียกสลับแห้งของดินซีเมนต์

นายกานต์ กันทาธรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ขนส่ง และทรัพยากรธรณี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

INFLUENCE OF NATURAL RUBBER LATEX ON COMPRESSIVE STRENGTH AND DURABILITY AGAINST WETTING AND DRYING CYCLES OF CEMENT STABILIZED SOIL

Karn Kantatham

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Civil, Transportation and Geo-resources Engineering

Suranaree University of Technology

Academic 2019

อิทธิพลของน้ำยางพาราต่อกำลังอัดและความทนทานต่อสภาวะเปียกสลับแห้ง ของดินซีเมนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์)
ประธานกรรมการ

(ศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)
กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กานต์ กันทาธรรม : อิทธิพลของน้ำยางพาราต่อกำลังอัดและความทนทานต่อสภาวะเปียกสลับแห้งของดินซีเมนต์ (INFLUENCE OF NATURAL RUBBER LATEX ON COMPRESSIVE STRENGTH AND DURABILITY AGAINST WETTING AND DRYING CYCLES OF CEMENT STABILIZED SOIL) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข, 78 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของน้ำยางธรรมชาติต่อพฤติกรรมการบดอัด การรับแรงอัดและความทนทานของดินซีเมนต์ ดินที่ใช้ในการศึกษาเป็นดินเม็ดหยาบที่ไม่ผ่านมาตรฐานวัสดุชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวง ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษา เท่ากับ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของดิน อัตราส่วนน้ำต่อปริมาณน้ำยางธรรมชาติโดยน้ำหนักเท่ากับ 100: 0, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25 และ 70:30 โดยน้ำหนัก งานวิจัยนี้ทำการทดสอบการบดอัด กำลังรับแรงอัดแกนเดียว และความทนทานภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง ของดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติ นอกจากนี้ ยังเปรียบเทียบผลทดสอบในห้องปฏิบัติการกับมาตรฐานชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ทางของกรมทางหลวง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นแห้งของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำยางพาราธรรมชาติ ส่งผลให้การรับกำลังแรงอัดเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนปริมาณน้ำยางพาราธรรมชาติที่เหมาะสมจากนั้นความหนาแน่นแห้งและกำลังอัดลดลง เมื่ออัตราส่วนปริมาณน้ำยางพาราธรรมชาติเพิ่มขึ้นเกินจุดที่เหมาะสมอัตราส่วนปริมาณน้ำยางเหมาะสมมีค่าเท่ากับ 80:20 ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาพด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่น และกำลังอัด ได้รับอิทธิจากการแทรกซึมของน้ำยางธรรมชาติ ซึ่งก่อตัวเป็นแผ่นฟิล์มอยู่ภายในช่องว่าง และก่อให้เกิดการพัฒนาของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค การสูญเสียกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์บดอัดภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้งมีค่าลดลง ตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของน้ำยางพาราธรรมชาติ โดยที่การสูญเสียกำลังอัดมีค่าต่ำสุดที่อัตราส่วนปริมาณน้ำยางพาราธรรมชาติที่เหมาะสม ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าน้ำยางพาราธรรมชาติสามารถเพิ่มความทนทาน และยืดอายุการใช้งานของดินซีเมนต์บดอัดในงานชั้นรองพื้นทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา | ลายมือชื่อนักศึกษา ____________

ปีการศึกษา 2562 | ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ____________

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

KARN KANTATHAM : INFLUENCE OF NATURAL RUBBER LATEX ON COMPRESSIVE STRENGTH AND DURABILITY AGAINST WETTING AND DRYING CYCLES OF CEMENT STABILIZED SOIL. THESIS ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., 78 PP.

CEMENT STABILIZED/NATURAL RUBBER LATEX/UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH/DURABILITY

This research is to study the influence of natural rubber latex on the compaction, compressive strength and durability of cement stabilized soil. The soil used in this research was problematic soil which did not meet the standard requirements for pavement subbase applicationbased on Department of Highways, Thailand. The binder in this study is cement at 3 percentages by weight of the soil. The ratio of water to natural rubber latex were mixed from 100:0, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25 and 70:30 by weight of water at optimal content. This research conducted the compaction test, unconfined compressive strength (UCS) test and wetting-drying cycles durability on the soil-cement stabilization with and without natural rubber latex.Moreover, the results obtained from laboratory were compared to the standard requirements of cement-stabilized soil for pavement subbase application. The results showed thatthe maximum dry density increased with increasing amount of natural rubber latex, which caused the improvement of compressive strength. The highest value of density and compressive strength were found at the optimum amount of natural rubber latex. Subsequently, the density and compressive strength decreased with excessive increase of amount of rubber latex beyond the optimum ratio. The optimal latex content was found to be 80:20. The microstructural analysis using SEM

indicated that the increased density and compressive strength affected by the infiltration of rubber latex. The rubber latex formed the latex film within the pores, causing the development of bonding strength between inter-particles. In addition, the losses of strength under the condition of wetting-drying cycles reduced with increasing amount of natural rubber latex and the lowest strength loss was found at the optimumrubber ratio. It can be indicated that natural rubber latex can effectively extend thedurability and serviceability of compacted soil-cement for pavement subbase.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Civil Engineering Student's Signature ____________

Academic Year 2019 Advisor's Signature ____________

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ และให้กำลังใจอย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัยดังนี้

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านวิชาการ แนะนำ และตรวจทานเนื้อหาจนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ที่กรุณาให้การแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในด้านวิชาการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ตันเส็ง ที่กรุณาให้การแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในด้านวิชาการ

คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่านที่ให้คำปรึกษา

ขอขอบคุณบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีและให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอจนสำเร็จการศึกษา

กานต์ กันทาธรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

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

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ที่มาและความสำคัญ 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

2 ปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3
2.1 ประวัติความเป็นมาของการปรับปรุงดิน 3
2.2 ความเป็นมาของถนนดินซีเมนต์ 9
2.2.1 ประเภทของดินซีเมนต์ 10
2.2.2 กลไกของการปรับปรุงคุณสมบัติดินซีเมนต์ 11
2.2.3 กำลังของดินซีเมนต์ 14
2.3 การบดอัดดิน (Compaction) 18
2.4 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber) 21
2.4.1 แนวคิดการใช้ยางพาราผสมดินซีเมนต์ 21
2.5 การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) 24
2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังต้านทานแรงเฉือน 25
2.5.1.1 อัตราส่วนความชะลูด (Slenderness Ratio) 25

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.1.2 อัตราการเฉือน (Rate of Shearing) 25
2.6 ความทนทานของดินซีเมนต์ 29
2.7 มาตรฐานข้อกำหนดในการออกแบบดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ 32
3 วิธีดำเนินการวิจัย 34
3.1 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย 34
3.2 การดำเนินงานวิจัย 35
3.3 เตรียมดินตัวอย่างและสารเคมี 36
3.4 ปูนซีเมนต์ 36
3.5 น้ำยางพาราธรรมชาติ 36
3.6 การบดอัดดิน Compaction 37
3.6.1 ขั้นตอนวิธีการทำการทดสอบ เครื่องมือและอุปกรณ์ 38
3.6.2 การเตรียมตัวอย่าง 39
3.6.3 การทดสอบ 39
3.6.4 การคำนวณผลการทดสอบ 40
3.7 การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) 41
3.7.1 ขั้นตอนวิธีการทำการทดสอบ เครื่องมือและอุปกรณ์ 42
3.7.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ 42
3.7.3 การทดสอบ 43
3.7.4 การคำนวณผลการทดสอบ 44
3.8 การทดสอบความทนทาน (Durability) 45
3.9 การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM 45
3.10 ข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติ 46
4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ 48
4.1 บทนำ 48
4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน ซีเมนต์ และน้ำยางพาราธรรมชาติ 48

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 การบดอัดดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพารา 50
4.4 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดที่ผสมน้ำยางพารา 52
4.5 ความทนทานของดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางพารา 54
4.6 การวิเคราะห์ด้านโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางพารา 60
5 บทสรุป 64
5.1 สรุปผลงานวิจัย 64
5.1.1 พฤติกรรมการบดอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่ผสมน้ำยางพารา 64
5.1.2 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดที่ผสมน้ำยางพารา 64
5.1.3 คุณสมบัติความคงทนของดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพารา 64
รายการอ้างอิง 66
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 70
ประวัติผู้เขียน 78

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 วิธีปรับปรุงคุณภาพของดินที่ต่างชนิดกัน (United States Airforce, 1996)............................5

2.2 วิธีปรับปรุงคุณภาพของดินที่แปรผันตามขนาดเม็ดดิน (Metcalf, 1997)..............................6

2.3 แนวทางเลือกใช้สารผสมเพิ่มกับวัสดุแต่ละชนิด (Wilmot, 1995)...6

2.4 แนวทางเลือกใช้สารผสมเพิ่มกับดินแต่ละชนิด (Guyer, 2011)...8

2.5 มาตรฐานการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ 19

2.6 ข้อกำหนดคุณสมบัติดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ (สว. พิเศษ 1/2560) 33

3.1 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง 35

3.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำยางพาราธรรมชาติเปรียบเทียบกับข้อ
กำหนดการใช้น้ำยางพาราในคู่มือปฏิบัติงานการควบคุมคุณภาพและการรับรอง
มาตรฐานวัสดุ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ 37

4.1 ค่าจากผลการทดสอบในงานวิจัยเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ
กรมทางหลวง (ทล.-ม. 205)...50

4.2 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำเหมาะสมที่ใช้ในการบดอัด
(Optimum water content) ในอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติต่าง ๆ 51

4.3 ค่ากำลังอัดแกนเดียวและความเครียดที่จุดวิบัติ 53

4.4 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและปริมาณน้ำยางพารา ในอายุการใช้งานรอบเปียก–แห้ง......55

4.5 แสดงอัตราการสูญเสียน้ำหนักและปริมาณน้ำยางพาราธรรมชาติ ในอายุการ
ใช้งานรอบเปียก – แห้ง...57

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 สามเหลี่ยมขนาดคละของเม็ดดินสำหรับแบ่งประเภทการเลือกใช้สารผสมเพิ่ม 7

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Tangent Modulus in tension กับกำลังดึงและกำลังอัด (Wang and Huston, 1972)....................14

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Direct tensile strength กับ Unconfined compressive strength ของดินซีเมนต์ (Wang and Huston, 1972) 15

2.4 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell and Jack, 1966)....................16

2.5 โครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์ที่พบผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่นในแต่ละอายุบ่ม (Horpibulsuk et al., 2010)....................17

2.6 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ที่ใช้ของ Standard Proctor และ Modified Proctor....................19

2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง (γ_d) และเปอร์เซ็นต์ความชื้น (Percent water content) ของ Standard Proctor (1) และ Modified Proctor (2) 20

2.8 แผ่นฟิล์มโพลีเมอร์ในโครงสร้างระดับจุลภาค (Muhammad and Ismail (2012)) 24

2.9 การทดสอบหากำลังต้านทานแรงอัดของดินโดยไม่มีแรงดันด้านข้างมากระทำต่อผิว 25

2.10 อัตราส่วนความชะลูด (Slenderness Ratio) ของการทดสอบหากำลังต้านทานแรงเฉือน 25

2.11 แสดงอัตราการเฉือนที่มีผลต่อพฤติกรรมการวิบัติของตัวอย่าง....................26

2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และ แรงเฉือน (Shear Stress) ใน Mohr's Diagram....................28

2.13 เครื่องทดสอบ Unconfined Compressive Strength 29

2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (Strain) กับความเค้น (Yadav et al.,2016) 30

2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างรอบเปียก-แห้งกับน้ำหนักที่สูญเสีย (Yadav et al.,2016).................... 30

2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (Strain) กับกำลังรับแรงดึงทางอ้อมแบบผ่าซีก (Split tensile stress) (Yadav and Tiwari, 2017) 31

2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบเปียก-แห้งกับน้ำหนักที่สูญเสีย (Yadav and Tiwari, 2017)....................32

3.1 แผนผังขั้นตอนดำเนินงานวิจัย 35

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน 49
4.2 ความถ่วงจำเพาะ ขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดพลาสติกและดัชนีสภาพพลาสติกของดิน 49
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) กับปริมาณน้ำ เหมาะสมที่ใช้ในการบดอัด (Optimum water content) ในอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติต่าง ๆ 51
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าค่ากำลังอัดแกนเดียวและความเครียด 53
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณน้ำยางพาราธรรมชาติ....54
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณน้ำยางพาราที่อายุการใช้งาน 55
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียและปริมาณน้ำยางพาราที่อายุการใช้งาน 57
4.8 ตัวอย่างการสูญเสียน้ำหนักต่ออายุการใช้งานสภาวะเปียกสลับแห้งของดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วนน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 80:20 (A) และดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติ (B) ที่ 1 รอบอายุการใช้งาน 59
4.9 ตัวอย่างการสูญเสียน้ำหนักต่ออายุการใช้งานสภาวะเปียกสลับแห้งของดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วนน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 80:20 (A) และดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติ (B) ที่ 3 รอบอายุการใช้งาน 59
4.10 ตัวอย่างการสูญเสียน้ำหนักต่ออายุการใช้งานสภาวะเปียกสลับแห้งของดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วนน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 80:20(A) และดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติ (B) ที่ 6 รอบอายุการใช้งาน 60
4.11 โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติระยะเวลาการบ่ม 7 วัน ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 3....61
4.12 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติที่อัตราส่วนเท่ากับ 80:20 มีระยะเวลาการบ่ม 7 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 3....62
4.13 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติที่อัตราส่วนเท่ากับ 70:30 มีระยะเวลาการบ่ม 7 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 3....63

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ดินเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีอยู่อย่างมากมายหลากหลายชนิด ซึ่งดินมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดและสภาพแวดล้อม ในปัจจุบันดินที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ผ่านมาตรฐานงานก่อสร้างมีค่อนข้างน้อย หรือบางครั้งอยู่ห่างไกลจากโครงการก่อสร้างส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งและมีปัญหามลพิษทางอากาศที่กระทบกับชุมชนในพื้นที่โครงการก่อสร้าง ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีความจำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพดินที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมไม่ผ่านมาตรฐานซึ่งอยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงโครงการก่อสร้างนำมาปรับปรุงให้มีความเหมาะสมกับงานในโครงการนั้นๆเพื่อเป็นการลดต้นทุนและอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ เทคโนโลยีและเทคนิคในการปรับปรุงดินที่ใช้กันในปัจจุบัน ประกอบไปด้วยแนวความคิด พื้นฐานหลักดังนั้นการทำให้แน่นการเชื่อมประสานการเสริมแรงการอัดตัวระบายน้ำ

Horpibulsuk (2006) ได้กล่าวว่า ในงานถนนทั่วไปพื้นผิวทางแบบดั้งเดิมนั้นประกอบด้วยชั้นพื้นทางและรองพื้นทางซึ่งมีบทบาทสำคัญในด้านความสามารถในการรับน้ำหนักและความสามารถช่วยให้ถนนไม่เกิดการทรุดตัว โดยปกติดินที่ผ่านมาตรฐานจะใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างชั้นฐานของถนน อย่างไรก็ตามแหล่งที่มาตามธรรมชาตินั้นส่วนมากดินมีคุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานและการขนส่งวัสดุดินที่ผ่านมาตรฐานจากแหล่งอื่นมีราคาแพงมากจึงเป็นเหตุผลในการปรับปรุงดินในพื้นที่ใกล้เคียงเพื่อทำการก่อสร้าง เพื่อเป็นการลดต้นทุนการก่อสร้างนั้นเอง

การปรับปรุงดินแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ 1)การปรับปรุงด้วยวิธีทางกลศาสตร์อันได้แก่วัสดุเสริมกำลังในดินอาจเป็นโลหะ (แผ่นเหล็ก) หรือวัสดุสังเคราะห์ (Geosynthetics) ซึ่งดินเป็นวัสดุตามธรรมชาติที่มีกำลังต้านทานแรงอัดสูงแต่มีกำลังต้านทานแรงดึงที่ต่ำมาก การเพิ่มกำลังต้านทานแรงดึงในดินสามารถทำได้โดยการเสริมวัสดุเสริมกำลัง ดินที่ได้รับการเสริมกำลังเรียกว่า “ดินเสริมกำลัง (Reinforced soil)” 2) การปรับปรุงด้วยวิธีเติมสารเคมีได้แก่จำพวก ปูนซีเมนต์ เป็นต้น ซึ่งการที่ดินผสมด้วยซีเมนต์นั้นจะช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงอัดได้สูงกว่าดินตามธรรมชาติจะทำให้มีพฤติกรรมการวิบัติเป็นแบบวัสดุเปราะ ในงานก่อสร้างถนนมีความจำเป็นให้วัสดุที่นำมาใช้ในงานถนนมีคุณสมบัติทางด้านการยืดหยุ่นหรือการดัด ซึ่งดินซีเมนต์เพียงอย่างเดียวไม่สามารถแก้ปัญหาในงานถนนได้อย่างยั่งยืน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของดินในชั้นรองพื้นทาง ในเรื่องของความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและความทนทานต่ออายุการใช้งานอันก่อให้เกิดการวิบัติในชั้นรองพื้นทาง และนำไปสู่การวิบัติอีกหลายประการที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้างถนน การวิจัยครั้งนี้ใช้ยางพาราซึ่งเป็นวัสดุที่มีความเป็นคุณสมบัติยืดหยุ่นสูง และสามารถหาได้ง่ายในประเทศไทย ผสมในดินซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่ยางพาราจะเพิ่มคุณสมบัติการรับแรงกด และคุณสมบัติความทนทานต่อสภาพเปียกและสภาพแห้งที่ยาวนานขึ้นยิ่งไปกว่านั้นจะทำการอธิบายโครงสร้างจุลภาคด้วยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ที่จำเป็นสำหรับการยืนยันการเกิดฟิล์มโพลีเมอร์ในพื้นที่ช่องว่างของดินบดอัดซึ่งเป็นปรากฏการณ์สำคัญของกลไกการทำให้ดินมีความเสถียรภาพต่อการใช้งานที่ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการบดอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่ผสมน้ำยางพารา

1.2.2 เพื่อศึกษากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดที่ผสมน้ำยางพารา เปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมน้ำยางพารา

1.2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติความคงทนของดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพารา กับดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมน้ำยางพารา

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ใช้อัตราส่วนยางพาราร้อยละ 0,10, 15, 20, 25, 30 ต่อน้ำหนักน้ำที่จุดปริมาณความชื้นเหมาะสมในการบดอัด

1.3.2 ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 3 ต่อน้ำหนักดินที่ใช้ในการบดอัด

1.3.3 มาตรฐานส่วนผสมและการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเพิ่มการรับกำลังแรงอัดของดินในชั้นรองพื้นทางโดยใช้น้ำยางพาราได้

1.4.2 สามารถเพิ่มคุณสมบัติความคงทนให้กับชั้นรองพื้นทางโดยใช้น้ำยางพาราได้

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมาของการปรับปรุงคุณภาพดิน

การปรับปรุงดินเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการได้รับการเสนอเป็นทางเลือกโดยใช้วัสดุที่ไม่ได้คุณภาพ การปรับปรุงเหล่านี้มีการจัดแสดงในรูปแบบวิธีต่าง ๆ เช่นวิธีทางกายภาพเครื่องกลและเคมี การรักษาเสถียรภาพทางเคมีโดยใช้การเติมสารเคมีอย่างใดอย่างหนึ่งหรือรวมกันนั้นได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางผ่านการวิจัยอย่างมาก (Marto,2014; Naeini,2012; Sariosseiri, 2009)

แนวความคิดเรื่องการปรับปรุงดินให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น โดยการผสมวัสดุเชื่อมประสานได้เกิดขึ้นเป็นเวลาหลายพันปีมาแล้ว วัสดุเชื่อมประสานที่ใช้กันในยุคแรก คือ ปูนขาวหรือวัสดุ ปอซโซลาน ซึ่งจะทำให้ค่าดัชนีสภาพพลาสติก (Plasticity Index, PI) ของดินลดลง และมีผลให้ดินรับ แรงอัดได้ดีขึ้น หลังจากนั้นได้มีการศึกษาอย่างต่อเนื่องมาหลายศตวรรษ (Terrel et al., 1979)

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930 เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้ามีปริมาณมากขึ้น ค.ศ. 1930-1939 สหรัฐอเมริกาได้เริ่มศึกษาการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต โดยในปี ค.ศ. 1937 Davis และคณะจากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ได้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตในปี ค.ศ.1948 ได้มีการใช้เถ้าลอยในการก่อสร้างจริง เช่น เขื่อน Hungry Horse ต่อมาในปี ค.ศ. 1970-1979 ได้เกิดวิกฤติการณ์น้ำมัน จึงทำให้ในปี ค.ศ. 1970-1979 ได้มีการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงมากทำให้มีปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นและได้มีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวางเพื่อทำความเข้าใจปฏิกิริยาเคมีของเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์ที่เกิดขึ้น

Hogentogler (1938) ได้กล่าวว่าการปรับปรุงคุณภาพของดินเป็นกระบวนการที่ทำให้ดินตามธรรมชาติมีความทนทานต่อการสึกหรอและการรับน้ำหนักดีขึ้น วิธีการที่ใช้อาจจะเป็นการบดอัดให้แน่นการนำสารผสมมาเติมลงในดินสารผสมนี้อาจจะอยู่ในรูปของเหลวหรือเป็นผงก็ได้

Cireo et al , (1962) อธิบายว่าการใส่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ลงในดินจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและโครงสร้างของดินดินเกือบทุกชนิดสามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้แต่ผลของการปรับปรุงคุณสมบัติของดินจะไม่เหมือนกันถึงแม้ว่าดินจะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์เหมือนกันปริมาณซีเมนต์ที่ใช้เท่ากันแต่คุณสมบัติทางเคมีต่างกันก็จะมีผลกระทบต่อการรับกำลังแรงอัดของดินไม่เหมือนกันด้วยแสดงว่าส่วนประกอบทางเคมีจะมีผลเป็นอย่างมากต่อการรับแรงอัดของดินซีเมนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Mitchell and Jack (1966) ได้อธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างของดินซีเมนต์โดยแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบในโครงสร้างของดินซีเมนต์ อนุภาคของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชั่นกับน้ำเป็นผลให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และปล่อยปูนขาวออกมาปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีอยู่ในดินและเกิดการแยกตัวหลังจากนั้นซีเมนต์เจลและสารที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะแพร่กระจายไปตามอนุภาคของดิน ส่งผลให้ดินมีความหนาแน่น (Density) และความแข็งแรง (Stiffness) เพิ่มขึ้น เป็นผลให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น

Kadhim (2014) ได้ศึกษาผลของยางมะตอยน้ำผสมดินยิปซั่มซึ่งจำแนกได้เป็นทรายที่มีขนาดเม็ด (Sand poorly grade) สัญญาลักษณ์ย่อ SP ตามวิธีจำแนกแบบเอกภาพ Unified soil classification (USCS) ทำการทดสอบโดยแปรผันปริมาณยางมะตอยร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ผลการทดสอบพบว่ายางมะตอยน้ำสามารถเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้แก่ดินได้และลดคุณ สมบัติการพังทลายของดินเมื่อแช่น้ำโดยค่าที่เหมาะสมของปริมาณยางมะตอย อยู่ที่ร้อยละ 6-8

Baghini (2013) ได้ศึกษาผลของยางอิมัลชั่นและซีเมนต์ในการปรับปรุงดินเม็ดหยาบโดยใช้วิธี Indirect Tensile Strength (ITS) Method ในการทดสอบกำลังและความทนทานพบว่าปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มค่าความแข็งแรง (Stiffness) ได้อย่างดีและยางอิมัลชั่นช่วยเพิ่มค่าการคืนตัว (Resilience) และค่าต้านการซึมผ่านของน้ำในชั้นดินที่ปรับปรุงด้วยยางอิมัลชั่น ของตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน

ในปัจจุบันมีการนำเถ้าลอยมาใช้กับงานคอนกรีตอย่างแพร่หลาย เพื่อเป็นการลดต้นทุนของคอนกรีตและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดเถ้าลอยทิ้ง นักวิจัยหลายท่านได้ ทำการศึกษาการนำเถ้าลอยลิกไนต์จากอำเภอแม่เมาะมาผสมในดินสำหรับงานถนน เช่น อนิรุทธ์ ธงไชย และ สุเทพ นิ่มนวล (2530); สมชัย กกกำแหง (2535); Rhee and Yong-Heun (1982) นักวิจัยเหล่านี้พบว่ากำลังอัดของซีมนต์ผสมเถ้าลอยมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น (ในช่วง 0-15%) ตามระยะเวลาการบ่ม และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลงในขณะที่ค่าขีดจำกัดเหลว พิกัดพลาสติก และดัชนีสภาพพลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย ด้วยเหตุนั้น United states airforce (1966) ได้เสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยแบ่งตามขนาดและค่า Plastic index ดัง ตารางที่ 2.1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.1 วิธีปรับปรุงคุณภาพของดินที่ต่างชนิดกัน

Soil Type	Most Effective Stabilization Method
1. Coarse Granular	Mechanical Blending Soil-Asphalt Soil-Cement Lime - Fly Ash
2. Fine Granular Soils	Mechanical Blending Portland Cement Stabilization Soil-Asphalt Lime-Fly Ash Chloride 3
3. Clays of Low Plasticity	Compaction Portland Cement Stabilization Chemical Water proofers Lime Modification
4. Clays of High Plasticity	Lime Stabilization

ที่มา: United States Airforce (1966)

Wilmot (1995) กล่าวว่า การรักษาเสถียรภาพในสนาม (In Situ Stabilization)ได้ใช้กับงานสร้างทางและวัสดุที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Recycling material)ในประเทศออสเตรเลีย โดยตั้งแต่ปี 1950 จะมีการใช้สารผสมเพิ่มคือ Cement, Cement – Fly Ash, Bitumen และ Hydrate lime ซึ่งตามแต่ละเฉพาะงาน Pavement recycling ต่อมาในปี 1980 ก็มีการนำปูนซีเมนต์มาผสมใช้กันอย่างแพร่หลาย กว้างขวางเพราะเพิ่มระยะเวลาในการทำงานให้รวดเร็วขึ้น และมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

Metcalf (1977) ได้เสนอการเลือกวิธีปรับปรุงคุณภาพของดิน ดังตารางที่ 2.2ซึ่งวิธีการจะต้อง เลือกให้เหมาะสมที่สุดในแต่ละชนิดของดิน โดยคำนึงถึงอิทธิพลของขนาดเม็ดดินเป็นหลัก โดยให้ความแข็งแรงเท่ากันในระยะยาว ปูนซีเมนต์ผสมดังกล่าวได้แก่ Cement - Slag, Cement – Fly Ash และ Cement - Lime ซึ่งใช้กันอย่าง กว้างขวางใน New South Wale, South Australia และ Queensland ซึ่งได้มีการเสนอแนวทางเลือกใช้ สารผสมเพิ่ม ดังตารางที่ 2.3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.2 วิธีปรับปรุงคุณภาพของดินที่แปรผันตามขนาดเม็ดดิน

Applicability of Stabilization Methods	Type of soil					
Designation	Fine clays	Coarse clays	Fine Silts	Coarse Silts	Fine sands	Coarse sands
Soil particle size (mm)	<.0006	.006-.002	.002-.01	.01-.06	.06-.4	.4-2.0
Soil volume stability	Very poor	Fair	Fair	Good	Very good	Very good
Type of stabilization application						
Lime	X	X	X			
Cement	X X	X X	X X	X X	X	X
Bitumen					X	X
Polymeric-organic		X X	X	X	X	
Mechanical		X	X	X	X	X
Thermal	X	X				

X = Range of maximum efficiencyXX = Effective, but quality control may be difficult ที่มา: Metcalf (1977)

ตารางที่ 2.3 แนวทางเลือกใช้สารผสมเพิ่มกับวัสดุแต่ละชนิด

Admixture	Crushed Rock	Well Graded Gravel	Silty/Clayey Gravel	Sand	Sandy Silty Clay	Heavy Clay
Cement	A	A	A	B	B	N
Blend Cementitious	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
Bitument	A	A	B	B	B	N

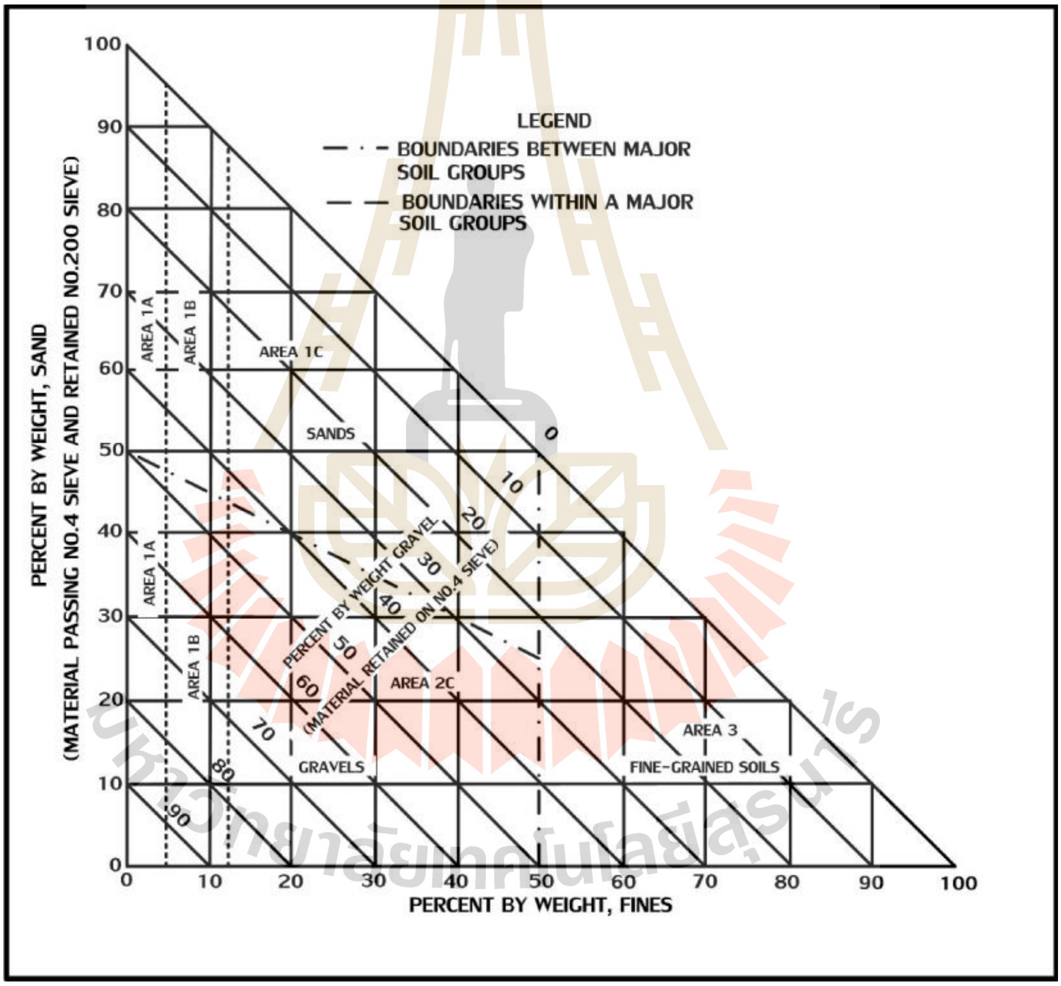
Usually very suitable “A” Usually satisfactory “B” Usually not suitable “N”

* Depend upon grading (Single size sand require higher additive content) ที่มา: Wilmot (1995)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Guyer (2011) ได้แนะนำการเลือกใช้สารผสมเพิ่มโดยใช้ รูปที่ 2.1 และตาราง 2.4 โดยรูปที่ 2.1 แสดงภาพสามเหลี่ยมขนาดคละของดิน (gradation triangle) ที่แบ่งประเภทของดินจากคุณลักษณะของ ขนาดเม็ดดินเมื่อแบ่งกลุ่มจากปริมาณของขนาดเม็ดดินแล้วนำไปพิจารณาร่วมกับตารางที่ 2.4 ที่แบ่งประเภทจากค่า*PI*ของดินก็จะสามารถทราบชนิดของสารผสมเพิ่มที่สามารถใช้ปรับปรุงได้

ดังนั้น ในการเลือกสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงดินต้องทราบข้อมูลด้านขนาดคละและค่าพิกัด Atterberg เพื่อใช้พิจารณาในการเลือก



รูปที่ 2.1 สามเหลี่ยมขนาดคละของเม็ดดินสำหรับแบ่งประเภทการเลือกใช้สารผสมเพิ่ม

ตารางที่ 2.4 แนวทางเลือกใช้สารผสมเพิ่มกับดินแต่ละชนิด

Area	Soil Class (a)	Type of stabilizing additive recommended	Restriction on LL and PI of soil	Restriction on percent passing No.200 sieve (a)	Remark
1A	SW or SP	(1) Bitumious (2) Portland cement (3) Lime-cement-fly ash	PI not to exceed 25		
1B	SW-SMor SP-SM or SW-SC or SP-SC	(1) Bitumious (2) Portland cement (3) Lime (4) Lime-cement-fly ash	PI not to exceed 10 PI not to exceed 30 PI not to exceed 12 PI not to exceed 25		
1C	SM or SC or SM-SC	(1) Bitumious (2) Portland cement (3) Lime (4) Lime-cement-fly ash	PI not to exceed 10 (b) PI not to exceed 12 PI not to exceed 25	Not to exceed 30% by weight	
2A	GW or GP	(1) Bitumious (2) Portland cement			

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.4 แนวทางเลือกใช้สารผสมเพิ่มกับดินแต่ละชนิด (ต่อ)

Area	Soil Class (a)	Type of stabilizing additive recommended	Restriction on LL and PI of soil	Restriction on percent passing No.200 sieve (a)	Remark
2B	GW-GM or GP-GM or GW-GC or GP-GC	(1) Bitumious (2) Portland cement (3) Lime (4) Lime-cement-fly ash	PI not to exceed 10 PI not to exceed 30 PI not to exceed 12 PI not to exceed 25		
2C	GM or GC or GM-GC	(1) Bitumious (2) Portland cement	PI not to exceed 10 (b)	Not to exceed 30% by weight	
3	CH or CL or MH or ML or OH or OL or ML-CL	(1) Portland cement (2) Lime	LL less than 40 and PI less than 20 PI not less than 12		Organic and strongly acid soils falling within this are not susceptible to stabilization by ordinary means 1

2.2 ความเป็นมาของถนนดินซีเมนต์

ถนนดินซีเมนต์เริ่มต้นใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ.1915 ในการก่อสร้างถนน Oak ในเมือง Sarasota รัฐ Florida โดยการขุดเอาดิน Shell จากอ่าวขึ้นมาผสมกับทรายและซีเมนต์แล้วทำการบดอัดด้วยรถบดไอน้ำที่มีน้ำหนัก 10 ตัน แทนการทำถนนคอนกรีต ในปี ค.ศ. 1920 หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับถนน ในประเทศรัฐ Iowa, South Dakota, Ohio, California และ Texas ได้เริ่มทดลองก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ แต่ผลการทดลองที่ได้มีความผันแปรอย่างมากจนไม่สามารถคาดการผลลัพธ์ได้ เนื่องจากความรู้ความเข้าใจเรื่องคุณสมบัติทางวิทยาศาสตร์ของดินในขณะนั้นยังมีน้อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มาก Mills (1935, 1936) ได้รายงานผลการค้นคว้าของ South Carolina State Highway Department ในปี ค.ศ.1932 โดย Dr. C.H. Moorefield ได้ทำการศึกษาส่วนผสมของดินกับซีเมนต์ที่ใช้ก่อสร้างถนนหลายสายในปี ค.ศ. 1933 และปี ค.ศ. 1934 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ดินซีเมนต์เป็นวัสดุที่เหมาะสมสาหรับใช้เป็นวัสดุพื้นทางของถนนที่มีราคาถูก Davidson (1961) และ Terrel et al. (1979) ได้บันทึกตรงกันว่าในปี ค.ศ.1935 South Carolina State Highway Department, Bureau of Public Roads และ Portland cement association ได้ร่วมกันก่อสร้างถนนซีเมนต์ยาว 1.5 ไมล์ใกล้กับเมือง Jonhsonville เพื่อเป็นการยืนยันผลการวิจัยของ South Carolina State Highway Department ต่อมาถนนดินซีเมนต์สายนี้เป็นที่รู้กันว่าเป็นโครงการแรกเกี่ยวกับวิศวกรรมถนนดินซีเมนต์ และจากความสำเร็จของโครงการนี้ ทำให้มีการทดลองขึ้นในอีกหลายรัฐของสหรัฐอเมริกาโดยที่องค์กร Portland cement association เป็นผู้ทดลองสร้างถนนดินซีเมนต์เหล่านี้ขึ้น

Davidson (1961) รายงานว่า ในปี ค.ศ. 1941-1944 ระหว่างสงครามโลกครั้งที่สอง ถนนดินซีเมนต์ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างสนามบินมากถึง 22 ล้านตารางหลา แต่ในขณะเดียวกัน การก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นอีก นอกจากดินซีเมนต์จะถูกใช้ทำถนนแล้ว ยังมีการใช้ดินผสมซีเมนต์เป็นวัสดุรองพื้นทางของถนนคอนกรีต ที่จอดรถ คลังเก็บสินค้า วัสดุรองพื้นอ่างเก็บน้ำ และคูคลองอีกด้วยจากนั้นการก่อสร้างถนนซีเมนต์ในไทยได้ริเริ่มโดยบริษัท The Siam Cement Company Ltd. (1965) ได้ทดลองนำดินซีเมนต์มาใช้เป็นพื้นทางของถนนสาย วารินชาราบ-เดชอุดม จังหวัดอุบลราชธานี เป็นสายแรกในประเทศไทยซึ่งมีความยาว 5 กิโลเมตร โดยกำหนดค่า CBR ของดินซีเมนต์ไว้ไม่น้อยกว่า 120 สำหรับถนนที่มีปริมาณการจราจรต่ำ และกำหนดค่ากำลังอัดไม่น้อยกว่า 852 กิโลปาสคาล สำหรับถนนประเภทต่ำกว่ามาตรฐาน และต่อมานักวิจัยในประเทศไทย ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และสมบัติกระแส จรัสกร (2544) ได้ทำการวิจัย โดยนำดินลูกรัง และดินทรายปนดินตะกอนมาผสมซีเมนต์ สรุปผลได้ว่าพลังงานในการบดอัดมีผลอย่างมากต่อกำลังของดินซีเมนต์ โดยมีความสัมพันธ์แบบลอการิทึม (Logarithm model) โดยที่ค่ากำลังอัดแกนเดียวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงพลังงานบดอัดต่ำ และจะช้าลงเมื่อพลังงานบดอัดสูง

2.2.1 ประเภทของดินซีเมนต์

Highway Research Board Committee on Soil-Cement Stabilization (1959) ได้แบ่งดินซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

1) Soil-cement เป็นดินที่ผสมซีเมนต์เพื่อให้ได้กำลังอัดตามมาตรฐานของ Portland Cement Association (PCA), ASSHTO หรือ ASTM ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะต้องมีปริมาณมากพอที่จะทำให้ดินซีเมนต์ดังกล่าวมีกำลังอัดหรือแรงแบกทานตามที่กำหนด สำหรับดินที่มีขนาดคละดีจะใช้ปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 5 ถึง 7 และจะสูงกว่านี้หากดินมีขนาดคละไม่ดีหรือมีค่า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ดัชนีพลาสติกสูง (Plasticity Index) กรณีที่ค่าดัชนีพลาสติกสูง ในการทำ Soil-Cement ควรทำการผสมปูนขาวเพื่อลดค่าดัชนีพลาสติกลง

2) Cement modified silty clay soil มักจะใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงของผิวหน้าดินเดิมที่เป็นดินเหนียว ที่มีลักษณะเปียกแฉะและมีความอ่อนตัวมากให้มีความแข็งแรงพอที่ยวดยานจะผ่านได้โดยไม่ลื่นไถล ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ประมาณร้อยละ 1 ถึง 3

3) Cement modified granular soil จะใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความเป็นพลาสติก การบวมตัว และการดูดซึมน้ำบน Cement modified crush rock ที่มักจะใช้เป็นพื้นทางของถนนที่มีผิวทางทั้งแบบยืดหยุ่นและมีผิวทางเป็นคอนกรีต โดยปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะมีค่าประมาณร้อยละ 1 ถึง 3 ของน้ำหนักดิน

4) Plastic soil cement มักใช้ในงานดาดปูนบนพื้นที่ลาดเอียง เช่น ปูด้านข้างถนนเพื่อการระบายน้ำ ดาดท้องคลองชลประทานและก้นอ่างเก็บน้ำ ดังนั้น Plastic soil cement จะต้องมีสภาพเหลวมากพอที่จะนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5) Cement treated soil slurry and grouts เป็นซีเมนต์ที่ผสมกับวัสดุประเภททรายและน้ำโดยมีปริมาณน้ำสูงมาก อาจมีส่วนผสมเพิ่มอื่นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของส่วนผสมให้มีค่า Workability สูง โดยปกติวัสดุประเภทนี้จะใช้เป็น Mud jacking material ในงานซ่อมบำรุงถนนที่เกิดปัญหาการทรุดตัวของคันทางหรือถูกน้ำกัดเซาะ และใช้เป็น Grouting material สำหรับยาหรืออุดรอยรั่วที่เกิดขึ้นในอุโมงค์ส่งน้ำ

2.2.2 กลไกของการปรับปรุงคุณสมบัติดินซีเมนต์

Lambe et al. (1959) อธิบายว่าซีเมนต์เป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นจากผลึกของ Tricalcium silicate (C_3S), Dicalcium silicate (C_2S), Tricalcium aluminate (C_3A), Teteacalcium aluminate ferrite (C4AF) เมื่อผสมกับน้ำและดินจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำให้ได้สารประกอบ Calcium silicate hydrate (CSH), Calcium aluminate hydrate (CAH) และ Hydrate lime ที่แยกตัวออกมาขณะเกิดปฏิกิริยา สารประกอบ CSH และ CAH จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสานเมื่อน้ำระเหยออกไป นอกจากนี้ Released Hydrate Lime ที่เกิดขึ้นในขบวนการดังกล่าวยังทำให้ความเป็นด่างเพิ่มขึ้น ทำให้ Colloid gel หรือ Cement gel ที่ประกอบไปด้วย CSH และ CAH เกิดการรวมตัวแล้วยึดเกาะกันเป็นมวลที่มีกำลังอัดสูงขึ้นตามอายุการบ่ม ในดินเม็ดหยาบ เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน การยึดเกาะกันของเม็ดดินจะคล้ายกับในคอนกรีต แต่ว่า Cement paste จะไม่อุดเต็มช่องว่างอนุภาคของเม็ดดิน แรงเชื่อมยึดติดจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวทางด้าน Mechanical interlock ของอนุภาคเม็ดดินที่มี CSH และ CAH เกาะอยู่ที่ผิวอนุภาคของเม็ดดิน

สำหรับดินเม็ดละเอียด แรงยึดเกาะกันจะประกอบไปด้วยแรงทางด้าน Mechanical interlock และ Chemical cementation การยึดเกาะทางด้าน Chemical cementation นั้นเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับ Silica และ Alumina ที่มีอยู่ตามผิวของเม็ดดินโดยมีน้ำเป็นตัวกลาง การเกิดปฏิกิริยาร่วมกับน้ำทำให้สารประกอบ CSH และ CAH เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และทำให้เม็ดดินเกิดการเชื่อมกันส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินที่ไม่ได้ผสมซีเมนต์เข้าไป

Davidson (1961) กล่าวว่า หลังการผสมซีเมนต์กับดินเหนียวชื้น จะทำให้ค่าพลาสติก (Plasticity) ลดลง เหตุผลน่าจะมาจากการแยกตัวของ Calcium ion ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กลไกที่เกิดขึ้นถ้าไม่มาจาก Cation exchange ก็น่าจะมาจากการจับกลุ่มเพิ่มขึ้นของ Cation ในดินเหนียว กระบวนการทั้งสองทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าที่มีอยู่อย่างหนาแน่นบริเวณอนุภาคดินเหนียว ส่งผลให้อนุภาคของดินเหนียวรวมตัวกันและตกตะกอนเป็นวัสดุที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นนี้ทำให้ดินเหนียวมีคุณสมบัติคล้ายดินตะกอนคือมีค่าพลาสติก (Plasticity) ต่ำ

Herzog (1963) กล่าวถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นการเกิดสารประกอบ CSH และ CAH ซึ่งเป็นปฏิกิริยาในช่วงแรก ส่วนปฏิกิริยาช่วงที่สองซึ่งต้องใช้เวลานาน เป็นปฏิกิริยาระหว่าง Calcium ion ที่เกิดจาก Released hydrated lime ของปฏิกิริยาไฮเดรชันกับ Silica และ Alumina ที่เป็นสารประกอบอยู่ในเม็ดดิน มีผลทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์สูงขึ้นตามอายุการบ่มที่นานขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าว รู้จักกันว่าปฏิกิริยาพอสโซลานิค

Moh (1965) ได้ศึกษาปฏิกิริยาของแร่ประกอบดินเหนียว กับซีเมนต์ และสารเคมีผสมเพิ่มจำพวกโซเดียม และได้เขียนปฏิกิริยาของดินซีเมนต์เป็นสมการทางเคมี ดังต่อไปนี้

$$\text{Cement} + H_2O \rightarrow CSH + CAH + Ca\,(OH)_2 \qquad (2.1)$$

$$Ca + (OH)_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2(OH)^- \qquad (2.2)$$

$$Ca^{2+} + (OH)^- + SiO_2\ (\text{Soil Silica}) \rightarrow CSH \qquad (2.3)$$

$$Ca^{2+} + (OH)^- + Al_2\,O_3\ (\text{Soil Alumina}) \rightarrow CAH \qquad (2.4)$$

จากสมการเคมีทั้ง 4 ข้างต้น สามารถอธิบายความเป็นมาได้ดังนี้

เมื่อซีเมนต์ผสมกับน้ำ จะเกิดผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่น นั้นคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH), แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และปูนขาว ($Ca(OH)_2$) ดังสมการหมายเลข (2.1) จากนั้นปูนขาว ($Ca(OH)_2$) จะแตกตัวออกเพื่อเตรียมทำปฏิกิริยาดังสมการ (2.2) ปูนขาวที่อยู่ในรูปไอออน จะรวมตัวกับสารประกอบซิลิกาและอลูมินาที่อยู่ดิน สมการ (2.3) และ (2.4) จากนั้นเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่นเช่นเดียวกับที่เกิดจากการรวมกันของซีเมนต์กับน้ำ

Pendola et al. (1969) สรุปว่าการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์นั้น เป็นกระบวนการร่วมกันของปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีระหว่างซีเมนต์ น้ำ และดิน ซึ่งประกอบด้วยกลไก 4 ชนิด คือ

Hydration of cement คือกระบวนการที่สำคัญ โดยขณะที่ซีเมนต์รวมตัวกับน้ำ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดการเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน และก่อรูปร่างเป็นโครงข่ายที่แข็งแรงต่อเนื่องมากบ้างน้อยบ้างตามการคละขนาดของเม็ดดิน ทำให้เม็ดดินที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกัน โครงข่ายที่กล่าวมาข้างต้นนอกจากจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุที่ถูกปรับปรุงแล้ว ยังแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของเม็ดดิน ทำให้ลดการซึมผ่านและการบวมตัวของมวลดิน รวมทั้งเพิ่มความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นรอบๆ อีกด้วย

Cation exchange การลดลงของค่าพลาสติกของดินหลังจากการผสมซีเมนต์กับดินประเภทมีความเชื่อมแน่นที่มีความชื้น เชื่อว่าเกิดจากการเปลี่ยน Cation หรือการรวมตัวกันของ Cation บนผิวของเม็ดดิน ปฏิกิริยาที่ว่าจะเกิดขึ้นภายในไม่กี่วันหลังการผสมซีเมนต์

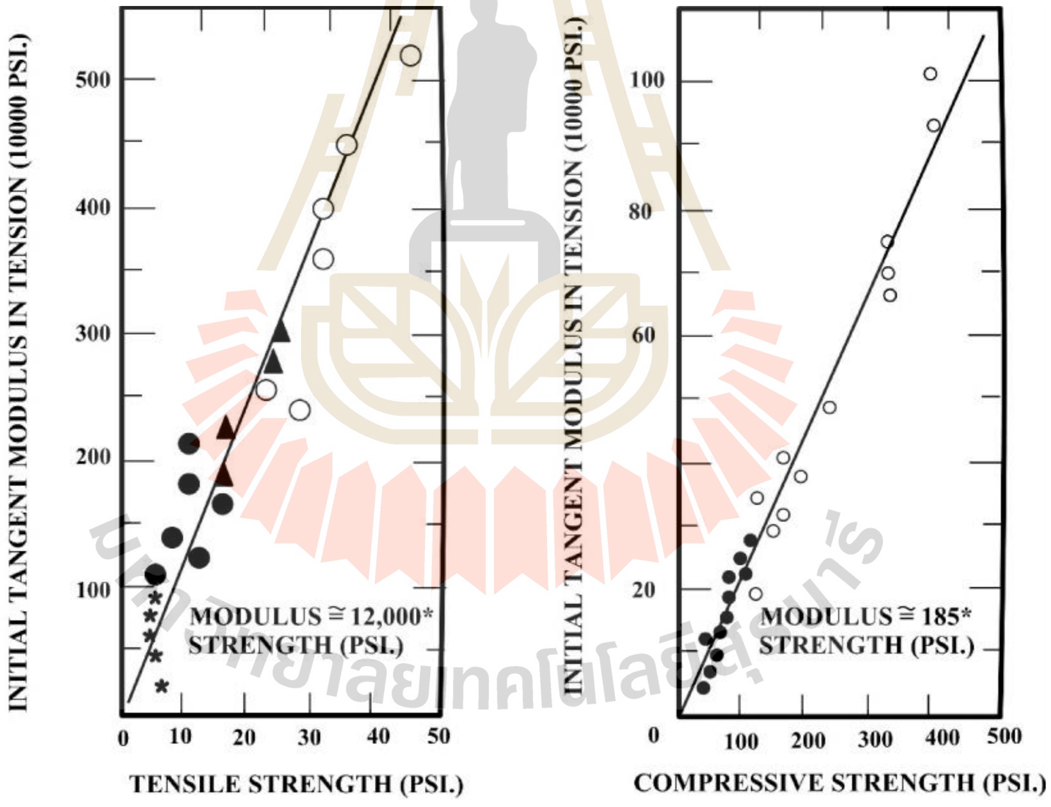
Carbonation คือ กระบวนการเชื่อมแน่นจากปฏิกิริยาเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศกับ Lime ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำ ให้เกิด Calcium carbonate ส่งผลให้เกิดสารเชื่อมแน่นเพิ่มมากขึ้น

Pozzolanic reaction คือกระบวนการระหว่าง Free lime ที่ถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับ Silica หรือ Alumina ที่มีอยู่ในดิน ทำให้เกิดสารเชื่อมแน่นเพิ่มขึ้น แต่ปฏิกิริยานี้จะต้องอาศัยระยะเวลานานและมีผลให้กำลังของวัสดุสูงขึ้น

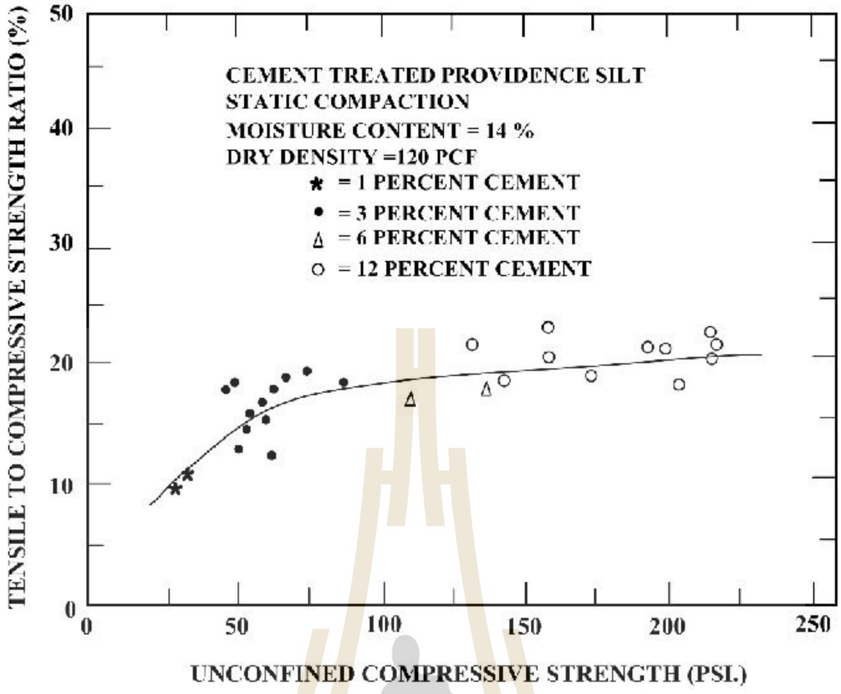
Terrel et al. (1979) กล่าวถึงปฏิกิริยาของดินซีเมนต์ว่า การผสมซีเมนต์กับดินเม็ดหยาบซีเมนต์เพส จะทำหน้าที่ยึดอนุภาคเม็ดดินเข้าด้วยกัน โดยทำการยึดเกาะที่ผิวระหว่างซีเมนต์เจลและผิวอนุภาค ส่วนดินเม็ดละเอียด แร่ดินเหนียวที่สลายออกมาในสภาวะแวดล้อมที่มีค่า pH สูง จะทำปฏิกิริยากับ Free lime หรือ Hydrate lime ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิด CSH และ CAH

2.2.3 กำลังของดินซีเมนต์

Wang and Huston (1972) ทำการทดสอบหากำลังดึงและกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับดินตะกอนที่ได้จาก Glacial deposit ใน Rhode Island พบว่าการเสียรูปที่จุดวิบัติจากการทดสอบทั้งแบบรับแรงอัดและรับแรงดึง จะมีค่าคงที่เสมอถ้าหากค่าความหนาแน่นแห้ง ปริมาณความชื้น และสภาพการบ่มเหมือนกัน ค่ากำลังและค่าการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบแบบรับแรงดึงจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแบบรับแรงอัด ค่ากำลังรับแรงดึง จะอยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 20 ของค่ากำลังรับแรงอัด ส่วนค่าการเสียรูปที่จุดวิบัติเนื่องจากแรงดึง จะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 1.0 ถึง 2.5 ของค่าการเสียรูปที่จุดวิบัติเนื่องจากแรงอัด สำหรับทุกอายุการบ่มและปริมาณซีเมนต์ที่ศึกษา และยังพบอีกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแรงอัดกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแรงดึง เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลัง ตามรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3

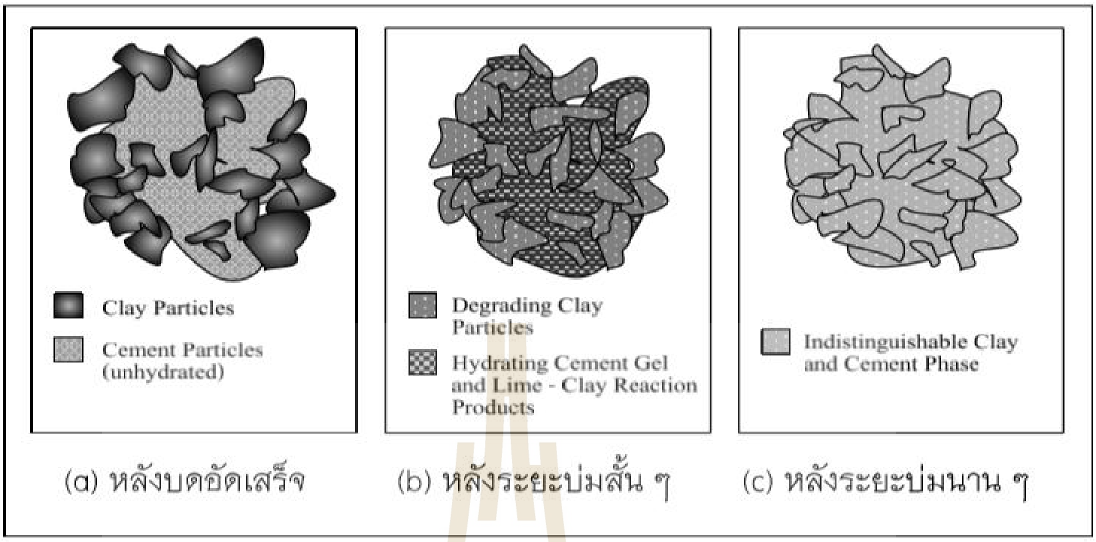


รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Tangent Modulus in tension กับกำลังดึงและกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Wang and Huston, 1972)



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Direct tensile strength กับ Unconfined compressive strength ของดินซีเมนต์ (Wang and Huston, 1972)

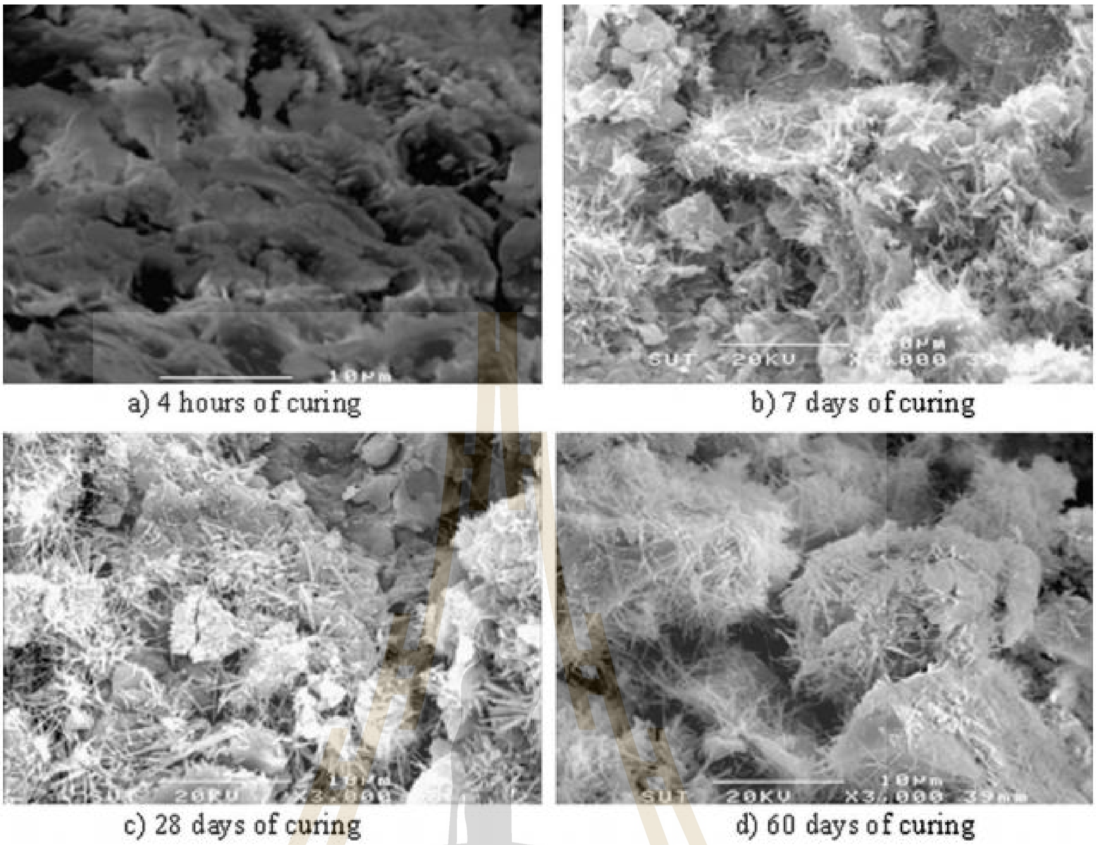
Mitchell and Jack (1966) ได้อธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างของดินซีเมนต์โดยแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบในโครงสร้างของดินซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เมื่อถูกบดอัดอนุภาค ของปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเข้าไปผสมกับอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.5(a) ในช่วงอายุบ่ม อันสั้นอนุภาคของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชั่นกับน้ำ เป็นผลให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตาม ช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และปล่อยปูนขาวออกมา ปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีอยู่ใน ดินและเกิดการแยกตัว หลังจากนั้นซีเมนต์เจลและสารที่ได้จากปฏิกิริยาจะแพร่กระจายไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.4 สำหรับช่วงอายุบ่มยาวนานปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชั่นจะเกิดอย่างสมบูรณ์ ทำให้ซีเมนต์เจลแทรกซึมกระจายไปทั่วทั้งก้อนของดินซีเมนต์ เป็นผลให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นเมื่ออายุบ่ม เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell and Jack, 1966)

แม้ว่าสารเติมแต่งทางเคมีจะมีความแตกต่างกันโดยปกติแล้วสารผสมเพิ่มที่ทำให้ดินมีเสถียรภาพเหล่านี้จะแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักคือ สารเติมแต่งแบบดั้งเดิมและไม่ใช่แบบดั้งเดิม (Marto,2014; Estabragh,2010; Jamsawang,2014; Onyejekwe,2014; Tingle,2007) สารเติมแต่งแบบดั้งเดิมนั้นเกี่ยวข้องกับสารเคมีในหมู่ ปูนขาว เถ้าลอย บิทูมินัสและซีเมนต์ ซึ่งได้รับการศึกษาและค้นพบอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับประสิทธิภาพของสารเหล่านี้ในสิ่งพิมพ์หลายชนิด การใช้ประโยชน์ของซีเมนต์ในการเพิ่มคุณสมบัติมีผลกระทบอย่างสำคัญต่อความสามารถในการรับน้ำหนักและการพัฒนาความแข็ง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่นเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากซีเมนต์เพื่อให้ได้ความแข็งแรงตามที่ต้องการอย่างคาดหวังไว้ บ่งชี้ได้ว่าผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่นเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาอายุบ่มเพิ่ม ดังรูปที่ 2.5 (Tingle, 2003; Baghini et al.,2014;Horpibulsuk et al., 2010)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.5 โครงสร้างระดับจุลภาคของดินซีเมนต์ที่พบผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่นในแต่ละอายุบ่ม (Horpibulsuk et al., 2010)

ถึงแม้ว่าการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์สามารถเพิ่มความแข็งแรงและคุณสมบัติทางวิศวกรรมได้ แต่ผลลัพธ์ของความแข็งแรงเนื่องจากผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่นของซีเมนต์อาจมีพฤติกรรมการแตกหักที่เปราะบางภายใต้แรงดัดและแรงกดซึ่งสามารถนำไปสู่การแตกร้าวในชั้นโครงสร้างทางและส่งผลต่อเสถียรภาพของชั้นผิวทางที่ตั้งอยู่ด้านบนของโครงสร้างทาง เกี่ยวกับข้อบกพร่องนี้สารเติมแต่งที่ไม่ใช่แบบดั้งเดิมซึ่งประกอบไปด้วย เรซิ่น กรดเอนไซม์และโพลีเมอร์ ถูกนำเสนอเป็นสารปรับปรุงเพื่อเพิ่มความสามารถในการใช้งานและความทนทานได้ดีกว่าดินซีเมนต์ นอกจากนี้สารเติมแต่งเหล่านี้ยังสามารถช่วยเสริมความทนทานให้ได้สูงขึ้นมากกว่าสารเติมแต่งแบบดั้งเดิม (Estabrag, 2011; Jamsawang,2014; Tingle,2007; Rezaeimalek, 2017)

จำนวนการใช้สารเติมแต่งอย่างเช่น โพลีเมอร์มีการใช้เพิ่มขึ้นอย่างมากในการประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความเสถียรภาพ เนื่องจากข้อได้เปรียบที่สำคัญคือการปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคของดินซึ่งเกิดจากการแทรกซึมของคอมโพสิตนาโน อนุภาคนาโนของพอลิเมอร์สามารถผลิตนาโน

ฟิลเลอร์โดยกระบวนการสร้างฟิล์มและการทำให้เกิดเป็นพอลิเมอไรเซชันเหล่านี้ ทำให้เกิดจากการเชื่อมโยงระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับพื้นผิวดินซึ่งส่งผลให้กำลังอัดและความสามารถรับแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น มากการการใช้เพียงปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว (Mojtaba Shojaei Baghini et al.,2016;Azzam,2014; Azzam,2011; Mirzababaei,2017; latifi,2014;Rezaeimalek,2017)

2.3 การบดอัดดิน (Compaction)

สำหรับโครงสร้างที่สร้างขึ้นมาจากดินนั้น เราจะต้องขนย้ายวัสดุจากบริเวณอื่นเพื่อทำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างจากกระบวนการขุดดินเพื่อขนย้ายวัสดุจะทำให้ดินหลวม ดังนั้นเราต้องทำการบดดัดเพื่อให้ดินแน่นขึ้น ซึ่งเมื่อดินแน่นแล้วจะมีความหนาแน่นสูงขึ้นนอกจากนี้แล้วยังจะทำให้กำลังและความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างของดินสูงขึ้นด้วย

นำดินจากแหล่งที่จะใช้มาทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการเพื่อหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด และปริมาณน้ำที่เหมาะสม

นำดินจากแหล่งที่จะใช้ไปบดอัดในพื้นที่ที่ต้องการ ตรวจสอบว่าดินที่บดอัดในสนามมีความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกับความหนาแน่นแห้งในห้องปฏิบัติการแล้วหรือยังถ้ายังต้องมีการแก้ไข โดยบดอัดเพิ่มขึ้น หรือรื้อขึ้นมาบดอัดใหม่ ในการบดอัดดินนั้นเราคำนวณพลังงานที่ให้กับดินเนื่องจารการตอกต่อปริมาตรได้ดังสมการ

$$E = \frac{(N_{blows})(N_{layer})(W_{hammer})(H_{drop})}{V_{mold}} \quad (2.5)$$

เมื่อ

E คือ พลังงานการบดอัดต่อปริมาตร 1 หน่วยหน่วยพื้นฐานของ Joule เท่ากับ kg- m^2/s^2 = N-m, 1 j = 1 N-m

N_{blows} คือ จำนวนการตกกระทบของค้อนใน 1 ชั้น (Number of blows per layer)

N_{layer} คือ จำนวนชั้นของการบดอัด (Number of layer)

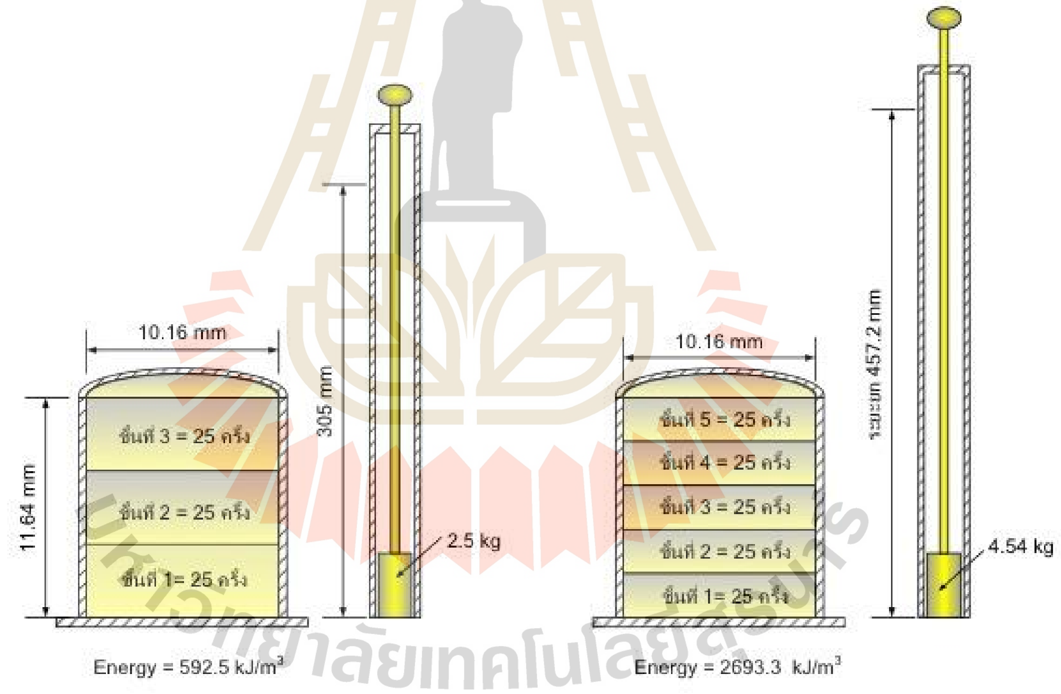
W_{hammer} คือ น้ำหนักค้อน (Weight of hammer)

H_{drop} คือ ระยะตกกระทบของค้อน (Height of drop of hammer)

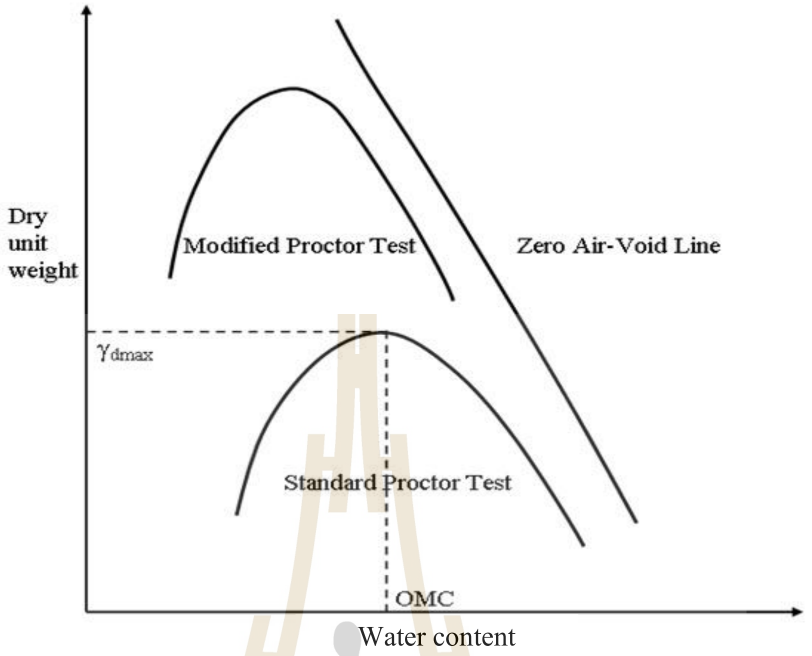
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ

	Standard Proctor test	Modified Proctor test
แบบที่ใช้ในการบดอัด	เส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 mm ความสูง 116.4mm	เส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 mm ความสูง 116.4mm
ลูกตุ้มที่ใช้ในการบดอัด	น้ำหนัก 2.5 kg ระยะยก 305mm	น้ำหนัก 4.54 kg ระยะยก 457.2mm
จำนวนครั้งของการบดอัด	แบ่งการบดอัดเป็น 3 ชั้น กระแทกลูกตุ้ม 25 ครั้งต่อ 1 ชั้น	แบ่งการบดอัดเป็น 5 ชั้น กระแทกลูกตุ้ม 25 ครั้งต่อ 1 ชั้น
พลังงานที่ใช้ในการบดอัด	พลังงานที่ใช้ =592.5kJ/m^3	พลังงานที่ใช้ =2693.3kJ/m^3



รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ที่ใช้ของ Standard Proctor และ Modified Proctor



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง (γ_d) และเปอร์เซ็นต์ความชื้น (Percent water content) ของ Standard Proctor (1) และ Modified Proctor (2)

ในการทำการบดอัดในห้องทดลองซึ่งปกติจะใช้เป็นมาตรฐานในการควบคุมการบดอัดในสนามต่อไป จะทำได้โดยการนำเอาวัสดุที่จะใช้บดอัดในสนามเข้ามาผึ่งให้แห้ง แล้วค่อยๆ เพิ่มน้ำเข้าไปในปริมาตรที่พอเหมาะแล้วเริ่มทำการบดอัดใน Mold (แบบที่ใช้บดอัด) โดยวิธีการที่จะพูดถึงรายละเอียดภายหลัง เมื่อชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาความหนาแน่นในครั้งต่อไปจะเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นเรื่อย อย่างน้อย 4 ถึง 6 ครั้ง เมื่อทราบความชื้นของการบดอัดแต่ละครั้ง ก็จะหาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของดินแห้งกับความชื้น จะปรากฏเป็นเส้นกราฟโค้งขึ้นมีจุดยอด ซึ่งเรียกว่า “ความหนาแน่นสูงสุด” (Maximum dry density) และความชื้นที่จุดนั้นเรียกว่า “ความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด” (Optimum water content)

การบดอัด (Compaction) มีอุปกรณ์ และมีขั้นตอนในการทดสอบโดยสังเขป ดังนี้

1. นำดินที่ต้องการจะทดสอบไปบดอัดในแบบตามมาตรฐาน Modified Proctor ใช้โมล (Mold) ขนาด 4 นิ้ว x 4.6 นิ้ว

2. จากนั้นนำดินไปชั่งน้ำหนักหาน้ำหนักดินในแบบหล่อและคำนวณปริมาณของแบบหล่อแล้วคำนวณความหนาแน่นเปียก

3. จากนั้นแบ่งดินจำนวนหนึ่งไปอบเพื่อหา Moisture content คำนวณความหนาแน่นแห้ง

4. ในการทดสอบจะใช้ความชื้นที่แตกต่างกัน 5 ถึง 6 ค่า

5. นำข้อมูลไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินกับความหนาแน่นแห้งจากกราฟจะได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด, Maximum dry density, $\gamma_{d\ max}$ และความชื้นเหมาะสมที่ทำให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด Optimum moisture content, w_{opt}

2.4 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

ยางธรรมชาติ (Natural Rubber) จัดเป็นทรัพยากรที่ทำรายได้หลักให้กับประเทศไทย แต่ส่วนใหญ่จะส่งออกในรูปของวัตถุดิบ ซึ่งมีราคาต่อหน่วยต่ำ เนื่องจากประเทศไทยยังไม่มีองค์ความรู้ที่จะใช้ในงานที่หลากหลายมากนัก วิธีการสร้างองค์ความรู้ในงานด้านอื่นๆ จึงมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติ ซึ่งจะกล่าวถึง 1. สถานการณ์ยางธรรมชาติในประเทศไทย 2. การใช้น้ำยาง (Latex) ในงานคอนกรีต 3. การประยุกต์ใช้น้ำยางพาราในงานคอนกรีต

ประเทศไทยได้มีความพยายามในการประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติในงานที่หลากหลายขึ้นเพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณการใช้และเพิ่มมูลค่า ส่วนหนึ่งได้มีการนำมาใช้ในงานวิศวกรรมโยธา จากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยพบว่าใน พ.ศ. 2545 ได้มีการศึกษาโดยสถาบันวิจัยยางร่วมกับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังถึงการใช้ยางธรรมชาติเพื่อปรับปรุงคุณภาพยางมะตอย (Asphalt) ให้มีคุณสมบัติดีขึ้นด้วยวิธีการหลายวิธีพบว่าเมื่อใช้น้ำยางธรรมชาติผสมกับยางมะตอย ชนิด AC 60/70 ในอัตราร้อยละ 6 (เนื้อยางแห้) ทำให้ยางมะตอยมีค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) สูงขึ้น และคุณสมบัติอื่นๆ สามารถผ่านมาตรฐานข้อกำหนดของ มอก. 851-2532 การผสมยางพารากับยางมะตอยในอัตราร้อยละ 5 ต้องใช้ยางพารา 1.5 ตันต่อการใช้ยางมะตอย 30 ตัน การราดผิวถนนที่มีความกว้าง 6 เมตร (2 ช่องจราจร) เป็นระยะทาง 1 กิโลเมตรจะต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นจากการราดผิวถนนที่ใช้ยางมะตอยเพียงอย่างเดียวคิดเป็นร้อยละ 20 ของราคายางมะตอย เมื่อคำนวณแล้วค่าใช้จ่ายจะต้องเพิ่มขึ้น 78 บาท/ตัน ดังนั้นในระทาง 1 กิโลเมตร จะต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น 2,340 บาท (ประสาท เกศวพิทักษ์ และ คณะ, 2545) ทั้งนี้ ค่าใช้จ่ายอาจเพิ่มขึ้นในสถานการณ์ปัจจุบัน เนื่องจากราคายางที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากการใช้ยางธรรมชาติดังกล่าวก็เป็นเงินที่หมุนเวียนอยู่ภายในประเทศเท่านั้น

2.4.1 แนวคิดการใช้ยางพาราผสมดินซีเมนต์

ด้วยคุณสมบัติที่ยืดหยุ่นและทึบน้ำของยางพารา จึงมีแนวคิดในการใช้ยางพาราผสมดินซีเมนต์เพื่อก่อสร้างถนน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของถนนดินซีเมนต์ให้ดีขึ้น เช่น แรงอัด แรงดัด แรงดึง และการดูดซึมน้ำ โดยน้ำยางพาราจะทำหน้าที่เป็นเสมือนตัวประสานและป้องกันการรั่วซึมได้ดี เพราะถนนดินซีเมนต์เมื่อก่อสร้างเสร็จจะพบปัญหาการ

แตกร้าว (Crack) และเกิดฝุ่นละอองทำให้ประสิทธิภาพของถนนลดลง จากงานวิจัยของ จตุรงค์ เสาวภาคย์ไพบูลย์ และคณะ (2553) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และน้ำยาโพลิเมอร์เคมโรด และพบว่าค่ากำลังอัดของตัวอย่างดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 และปูนซีเมนต์กับน้ำยาโพลิเมอร์เคมโรดที่ร้อยละ 5 จะมีค่ามากกว่าตัวอย่างดินลูกรังที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพอยู่ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 1,200 และ 1,300 ตามลำดับ และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของตัวอย่างดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 และปูนซีเมนต์กับน้ำยาโพลิเมอร์เคมโรดร้อยละ 5 จะมีค่ามากกว่าตัวอย่างดินลูกรังที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพร้อยละ 3,000 และ 4,900 ตามลำดับ

ธติพงศ์ หล่อพิศาลชัย และคณะ (2556) ศึกษาคุณสมบัติทางกลของดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพารา พบว่า อัตราส่วนดิน : ซีเมนต์ : น้ำยางพารา เท่ากับ 5 : 2 : 0.7 ให้ค่าที่ดีที่สุด ที่อายุการบ่ม 28 วัน ซึ่งได้กำลังอัด 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กำลังดัด 6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กำลังดึง 21 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 6 ตามลำดับ

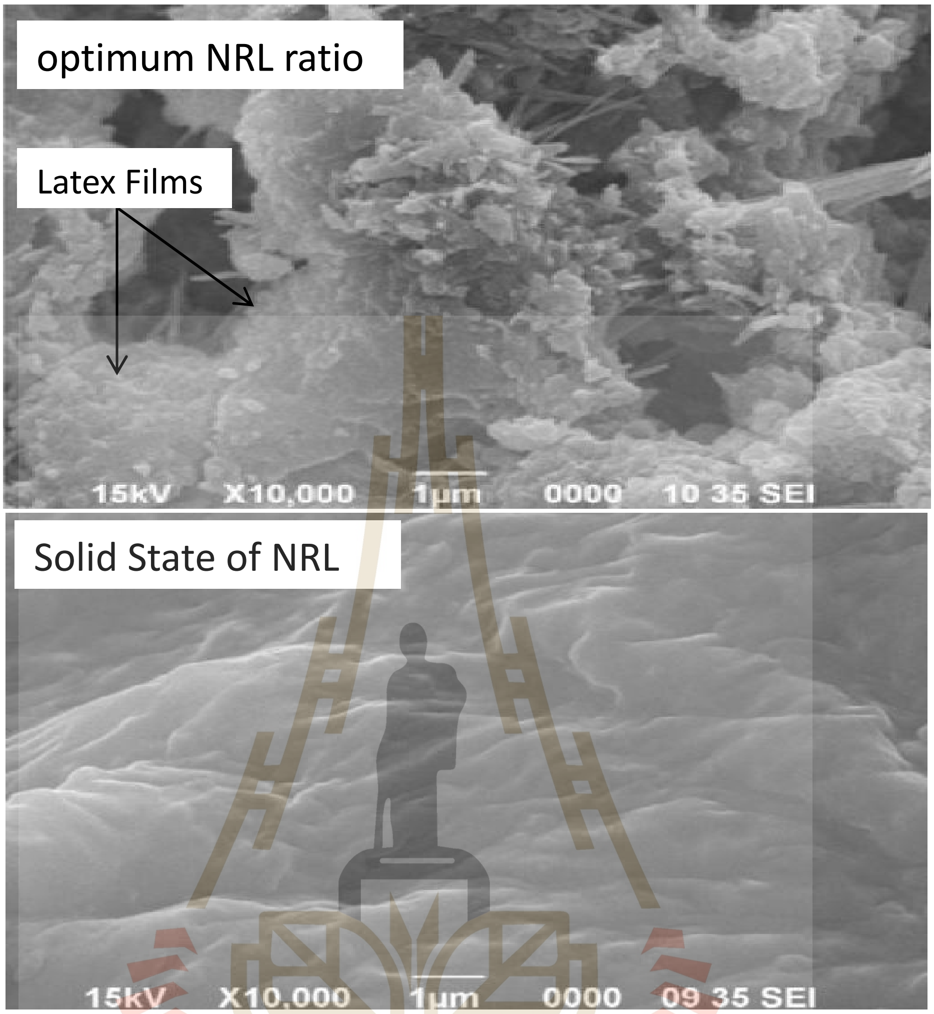
พีรวัฒน์ ปลาเงิน (2557) ประยุกต์ใช้น้ำยางพาราผสมดินซีเมนต์สร้างสระน้ำต้านภัยแล้ง โดยศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและทางวิศวกรรมของดินลูกรังผสมน้ำยางพารา (พรีวัลคาไนซ์) โดยใช้อัตราส่วนของดินลูกรัง : ปูนซีเมนต์ : น้ำและน้ำยางเท่ากับ 5 : 2 : 1 และใช้ปริมาณน้ำยางพาราร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 12.5 ของปริมาณน้ำที่ใช้ผสมดินซีเมนต์ การทดสอบประกอบด้วยกำลังอัด แรงดัด และแรงดึงของดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพารา ที่ระยะการบ่มแห้งในอากาศที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน และการดูดซึมน้ำของดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพารา ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนดิน : ซีเมนต์ : น้ำยางพารา เท่ากับ 5 : 2 : 1 และปริมาณน้ำยางร้อยละ 7.5 ของปริมาณน้ำ ให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมดีที่สุด ที่อายุบ่ม 28 วัน โดยมีค่ากำลังอัด 86 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กำลังดึง 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กำลังดัด 8.75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และร้อยละการดูดซึมน้ำ 6.23

ระพีพันธ์ แดงต้นกี (2559) ได้ศึกษา “พารารับเบอร์ซอยซีเมนต์” ซึ่งเป็นเทคโนโลยีเดียวกับการทำพื้นสนามบินในหลายประเทศ โดยการบดอัดถนนให้แน่นแล้วเกลี่ยหน้าดินให้หลวมนำซีเมนต์มาโรยแล้วไถคราดเกลี่ยให้ทั่วผิวหน้า (การผสมแห้ง) ด้วยแทรกเตอร์โรตารี่แบบง่าย แล้วใช้สเปรย์ที่ผสมน้ำยางพารากับหัวเชื้อโพลีเมอร์ ที่ทำหน้าที่ยึดโครงสร้างทั้งหมดไม่ให้น้ำซึม และบดอัดดินให้แน่นด้วยรถบดอัดเป็นชั้นๆ จนได้ความหนาที่ต้องการเพื่อให้ตัวน้ำยางเข้าไปทุกอณูของดิน ความหนาของถนนจะอยู่ที่ประมาณ 15-20 เซนติเมตร น้ำยางพาราช่วยเสริมความยืดหยุ่นความเหนียว และป้องกันฝุ่น จึงสามารถใช้เป็นผิวถนนได้ โดยไม่ต้องจำเป็นต้องเทยางมะตอยถนนที่ก่อสร้างนี้มีอายุใช้งานนานถึง 10 ปี โดยปราศจากปัญหาการขับขี่และการยึดเกาะถนนเหมาะกับถนนตามต่างจังหวัด ใช้เวลาในการทำ 1-2 วัน เมื่อเทียบด้านค่าใช้จ่ายต่อถนน 1 ตาราง

เมตร พบว่าถนนยางพาราใช้งบประมาณ 200-300 บาท ขณะที่ ถนนยางมะตอยใช้งบประมาณ 350-400 บาท และถนนคอนกรีตที่ใช้งบประมาณ 750-800 บาท แต่อายุการใช้งานเท่ากัน โดยที่ 1 ตารางเมตร สามารถนำน้ำยางพาราไปใช้ได้ถึง 3 ลิตร ดังนั้น ถ้าถนนมีความยาว 1 กิโลเมตร สามารถใช้น้ำยางได้ถึง 18 ตัน หรือ 18,000 ลิตร นอกจากใช้ทำถนนแล้ว ตัวยางแผ่นหรือยางแห้งยังสามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงถนนคันดินถมได้อีกด้วย โดยการนำมาขึ้นรูปเป็นลักษณะรังผึ้งเล็ก 10-15 ซม. เรียกว่า “จีโอเซลล์” ใช้งานลักษณะเดียวกันกับ “จีโอเท็กไทร์” ในงานถนน กล่าวคือ ปูระหว่างชั้นทางกับชั้นรองพื้นทาง เพื่อช่วยเพิ่มความเสียดทานระหว่างพื้นผิวมีความยืดหยุ่น และช่วยกระจายหน่วยแรงลงไปยังชั้นดินเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มกำลังแบกทานของคันดินถม เมื่อเทียบกับถนนปกติ จีโอเซลล์จากยางพาราทำให้มีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างน้อยร้อยละ 50-70 ของอายุการใช้งานเดิม ช่วยยืดอายุการใช้งานของถนนได้ดียิ่งขึ้น โดยพื้นที่หนึ่งตารางเมตรจะใช้ยางพาราแห้งประมาณ 10 กิโลกรัม ดังนั้น ถนนเส้นความยาว 1 กิโลเมตร หรือ 6,000 ตารางเมตร จะใช้ยางพารา 60,000 กิโลกรัม

ความน่าดึงดูดใจและข้อได้เปรียบของการใช้น้ำยางพาราธรรมชาติได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยหลายชิ้นที่มักเกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคอนกรีตและปูนเพื่อส่งเสริมวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน นอกจากนี้การใช้สารเติมแต่งเหล่านี้ลงในคอนกรีตและปูนมีผลอย่างมากต่อการพัฒนาความแข็งแรงและความทนทานที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความต้านทานต่อสิ่งแวดล้อม ความต้านทานต่อกรด ความต้านทานต่อซัลเฟตและการเสื่อมสภาพของความร้อนก็เพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากคอมโพสิตนาโนของน้ำยางธรรมชาติสามารถเกิดขึ้นได้จากฟิล์มโพลีเมอร์ที่เกิดจากน้ำยางธรรมชาติ โพลิเมอร์ ซึ่งจะเปลี่ยนเมทริกซ์ซีเมนต์ไปเป็นเมทริกซ์ซีเมนต์โพลิเมอร์ โดยแผ่นฟิล์มโพลีเมอร์จะเข้าไปเติมเต็มในโครงสร้างรูพรุนในระดับจุลภาค เกิดเป็นเมทริกซ์ที่ผสมผสานระหว่างซีเมนต์และโพลิเมอร์ซึ่งทำงานร่วมกันโดยซีเมนต์จะเป็นตัวที่เพิ่มความสามารถในการรับแรง ส่วนโพลิเมอร์จะช่วยให้มีความหยืดหยุ่นสูงขึ้น (Nagaraj, 1988; Muhammad and Ismail, 2012; Ahmed, 2014)

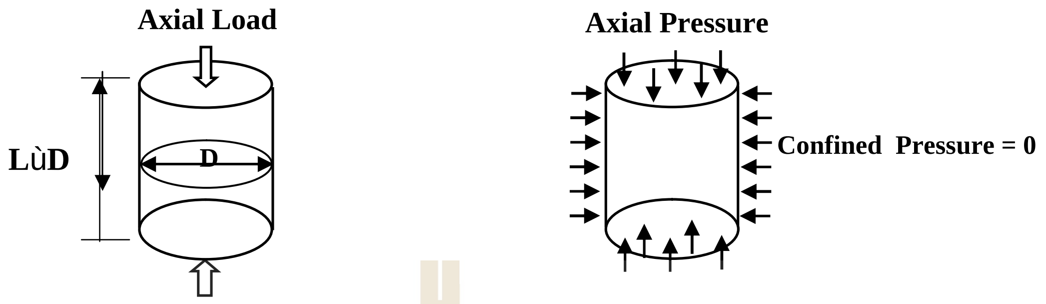
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.8 แผ่นฟิล์มโพลีเมอร์ในโครงสร้างระดับจุลภาค (Muhammad and Ismail,2012)

2.5 การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test)

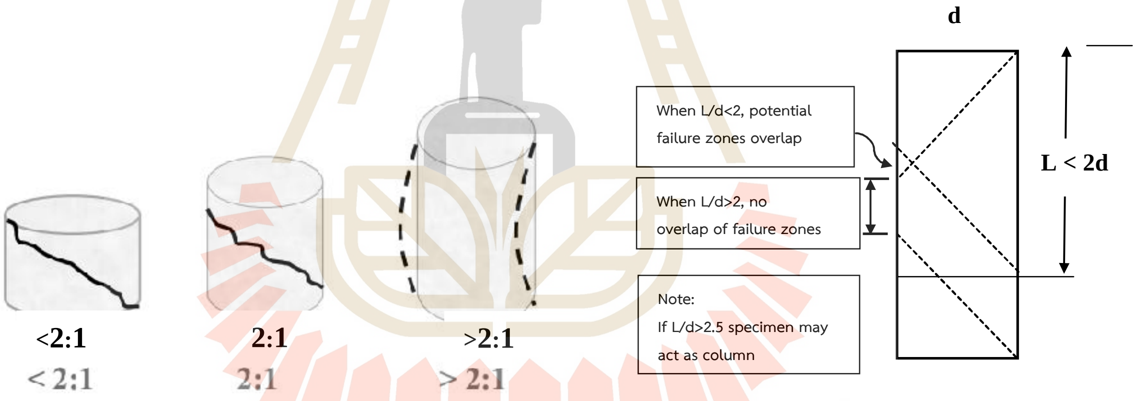
เป็นการทดสอบหากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินโดยไม่มีแรงดันด้านข้างมากระทำต่อผิวตัวอย่างดิน ทำให้สภาพของตัวอย่างดิน ที่ทดสอบแตกต่างจากสภาพดินในธรรมชาติการทดสอบนี้สามารถให้ผลได้รวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบเป็นเพียงค่าโดยประมาณเท่านั้น แต่ก็สามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัย จึงเป็นวิธีที่แพร่หลาย



รูปที่ 2.9 การทดสอบหากำลังต้านทานแรงอัดของดินโดยไม่มีแรงดันด้านข้างมากระทำต่อผิว

2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังต้านทานแรงเฉือน

2.5.1.1 อัตราส่วนความชะลูด (Slenderness Ratio)

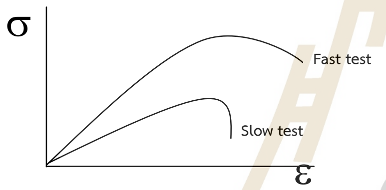
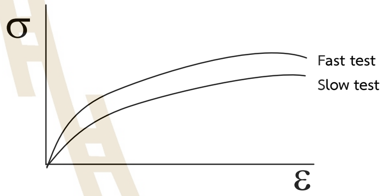
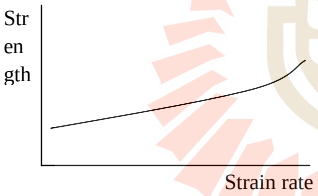
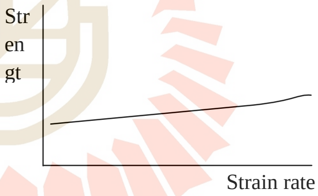


รูปที่ 2.10 อัตราส่วนความชะลูด (Slenderness ratio) ของการทดสอบหากำลังต้านทานแรงเฉือน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.5.1.2 อัตราการเฉือน (Rate of Shearing)

อัตราการเฉือนประมาณ 0.5 – 2% ของความสูงตัวอย่างต่อนาทีสำหรับดินเหนียวทั่วไปใช้อัตราการเฉือน 2% ต่อนาที และมีการยุบตัว 20% Strain โดยต้องทดสอบให้เสร็จสิ้นภายในเวลา 10 นาที

Brittle Failure	**Plastic Failure**
Failure by splitting or pronounced failure planes	Failure by bulging
Occurs where there are large negative pore pressures in unconfined compression tests. 1. Soils compacted dry of optimum water content. 2. Stiff saturated soils.	Occurs in triaxial tests with large chamber pressure, or where there are small negative pore pressures in unconfined compression tests. 1. Soils compacted wet of optimum water content. 2. Soft saturated soils.
Strain-at-failure affected by strain-rate  	Strain-at-failure independent of strain-rate 
Large strain-rate effect  	Moderate strain-rate effect 

รูปที่ 2.11 แสดงอัตราการเฉือนที่มีผลต่อพฤติกรรมการวิบัติของตัวอย่าง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้กล่าวมาตั้งแต่การทดลอง Direct Shear แล้วว่า ความแข็งแรงของดินอาจแทนได้ด้วยสมการ Mohr–Coulumb

$$\tau = c + \sigma \tan \emptyset \qquad (2.6)$$

ถ้าเป็นดินเหนียวอ่อนอิ่มตัวและภายใต้แรงกดที่กระทำในเวลาอันรวดเร็ว $\tan\emptyset$, จะมีค่าน้อยและถ้าให้ $\tan \emptyset = 0$

$$\tau = c \tag{2.7}$$

เมื่อ

τ คือ กำลังต้านทานแรงเฉือน (Shearing strength)หน่วยกิโลนิวตันต่อตารางเมตร (kN/m^2)

c คือ ค่าความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน (Cohesion)

σ คือ แรงกดทับในแนวแกน(Normal stress)หน่วยกิโลนิวตันต่อตารางเมตร (kN/m^2)

$\emptyset$ คือ มุมของแรงเสียดทานภายใน (Angle of internal friction)

ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ใช้ใน Unconfined compressive strength ในการทดลอง Unconfined compression test ตัวอย่างดินรูปทรงกระบอกจะถูกกดทางแนวดิ่ง โดยไม่มีความดันหรือการอัดช่วยทางด้านข้าง ดังรูปที่ 2.11 คล้ายกับการกดตัวอย่างคอนกรีต ข้อมูลที่เราจะบันทึกไว้ก็คือ แรงกดในแนวดิ่ง (F_v) และการหดตัวของตัวอย่าง (ΔV) ตัวอย่างดินจะรับแรงเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด (F_{vmax})

ถ้าเราลองนำค่าหน่วยแรงโดยรอบ ตัวอย่างดินมาเขียนลงใน Mohr’s Diagram ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ผลที่ได้คือ ค่า cohesion โดยประมาณของดินนั้น

$$\text{Estimated } C = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{F_{v(max)}}{2A_c} \tag{2.8}$$

เมื่อ

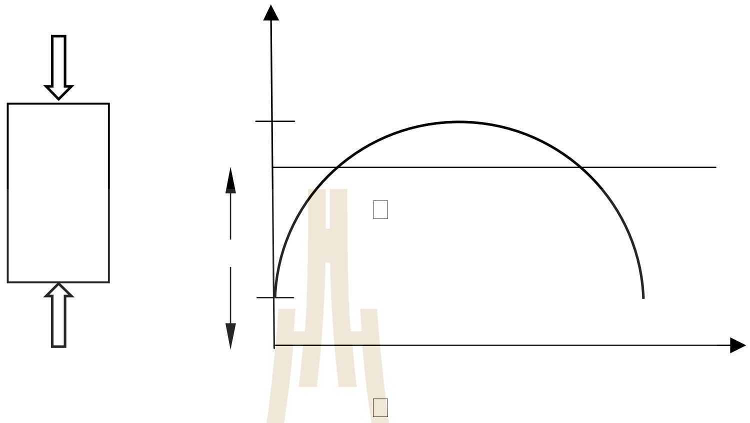
c คือ ค่าความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน (Cohesion)

σ_1 คือ แรงกดทับในแนวแกน (Normal Stress) หน่วยกิโลนิวตันต่อตารางเมตร (kN/m^2)

$F_{v(max)}$ คือ ค่าแรงกดที่อ่านได้จากเกรทวัดแรง (Dial gauge) หน่วย กิโลนิวตัน (kN)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนไปในระหว่างการทดสอบ หน่วยตารางเมตร (m^2)



รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และ แรงเฉือน (Shear stress) ใน Mohr's Diagram

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength) มีอุปกรณ์และมีขั้นตอนในการทดสอบโดยสังเขป ดังนี้

1. นำดินที่ต้องการจะทดสอบไปบดอัดในแบบตามมาตรฐาน Modified Proctor ใช้โมล (Mold) ขนาด 4 นิ้ว x 4.6 นิ้วดินตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 102 มม. และความสูง 116.43 มม. แล้วนำตัวอย่างออกจากโมล (Mold)โดยใช้แม่แรงไฮโดริค

2. จากนั้นนำดินตัวอย่างที่ออกจากโมล (Mold) แล้วไปห่อในถุงไวนิลและเก็บไว้ในห้องควบคุมความชื้นของอุณหภูมิคงที่จนกระทั่ง 7 วัน

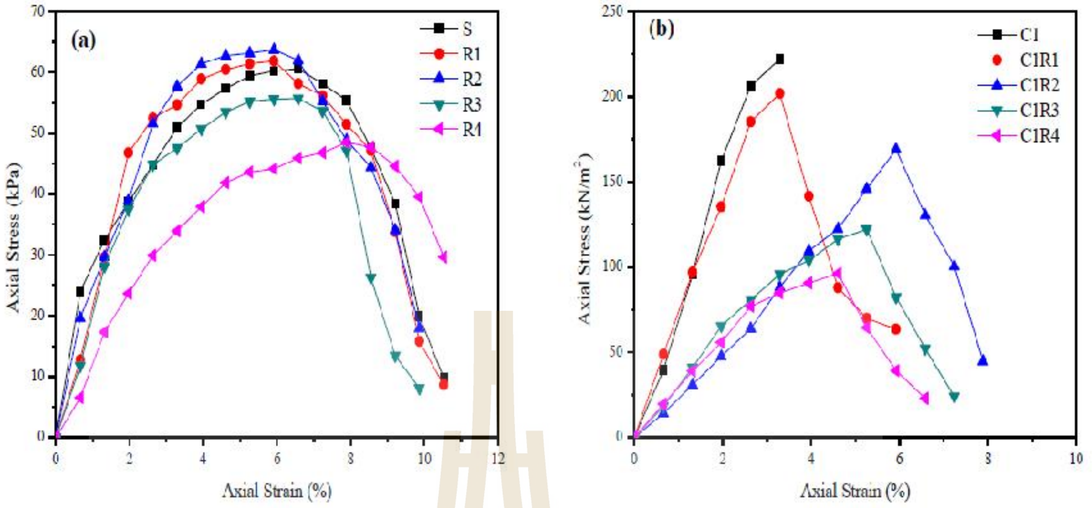
3. เมื่อครบอายุบ่ม 7 วันแล้วนำไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมงแล้วนำมาตากไว้ให้อิ่มตัวด้วยน้ำผิวแห้ง

4. ในการทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบที่อัตราการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งที่ 1 มิลลิเมตรต่อนาที

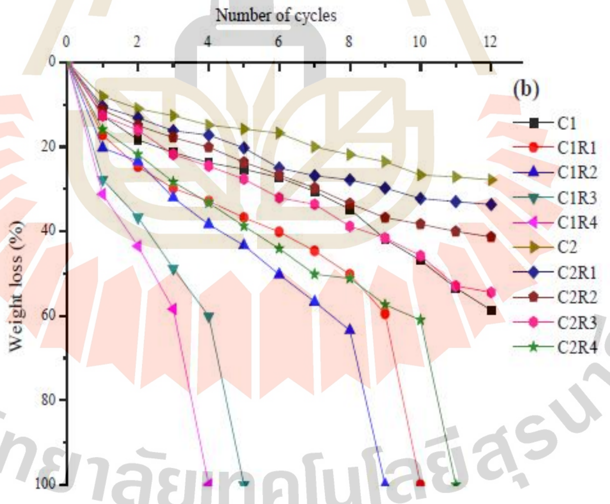
รูปที่ 2.13 เครื่องทดสอบ Unconfined Compressive Strength

2.6 ความทนทานของดินซีเมนต์

Yadav et al., (2016) ได้ศึกษาการปรับปรุงดินซีเมนต์โดยการใช้วัสดุเศษยางรถยนต์ จากผลการศึกษาดังกล่าวพบว่าเมื่อผสมเศษยางรถยนต์ลงไปในดินซีเมนต์นั้นโดยแทนที่น้ำหนักของดินซีเมนต์จะเพิ่มคุณสมบัติให้มีพฤติกรรมหยืดหยุ่นได้ดีกว่าแบบไม่ผสมยางรถยนต์ ในด้านรับกำลังอัดและความคงทนในรอบเปียก-แห้ง นั้นจะมีคุณสมบัติที่ไม่ดีเท่าดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมเศษยางรถยนต์ สังเกตได้จากรูปที่ 2.14a พบว่าเมื่อผสมเศษยางรถยนต์เข้ากับตัวอย่างดิน (R1) จะส่งผลให้มีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าดินที่ไม่ผสมเศษยางรถยนต์ (S) และรูปที่ 2.14b พบว่าเมื่อผสมเศษยางรถยนต์เข้ากับตัวอย่างดินซีเมนต์ (C1R1) จะทำให้กำลังรับแรงอัดน้อยกว่าดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมเศษยางรถยนต์ (C1) แต่การผสมเศษยางรถยนต์นั้นจะสามารถช่วยเพิ่มคุณสมบัติความเป็นวัสดุยืดหยุ่นได้ดีกว่าตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมเศษยางรถยนต์ จากรูปที่ 2.15ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบเปียก-แห้งกับน้ำหนักที่สูญเสียจะบ่งบอกถึงพฤติกรรมการยึดเกาะระหว่างเม็ดดินกับเศษยางรถยนต์ที่ยึดเกาะกันไม่ดีนักเนื่องจากเศษยางรถยนต์นั้นไม่สามารถเป็นเนื้อเดียวกับเม็ดดินหรือแทรกตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้จึงทำให้การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมเศษยางรถยนต์ (C1R1)สูญเสียน้ำหนักมากกว่าตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมเศษยางรถยนต์ (C1)



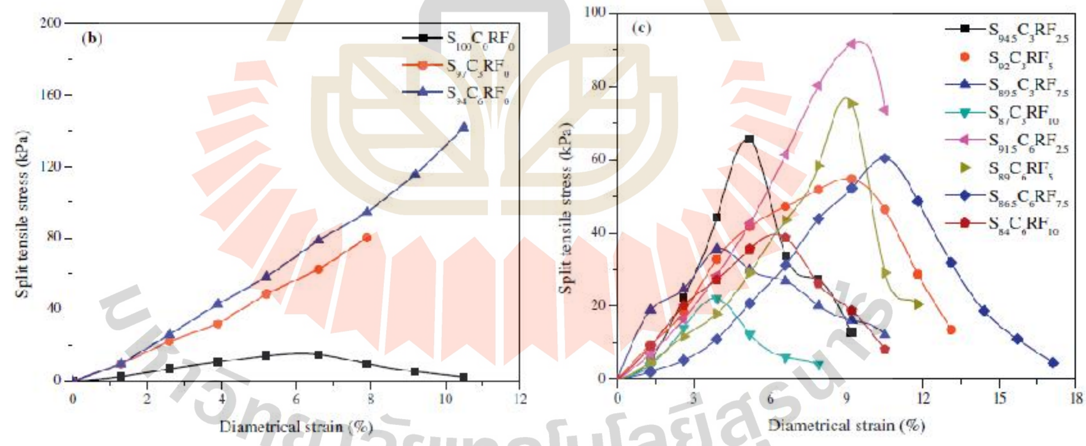
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (Strain) กับความเค้น (Stress) รูป a คือส่วนผสมของดินที่ผสมเศษยางรถยนต์เพียงอย่างเดียว รูป b คือส่วนผสมของดินซีเมนต์ที่ผสมเศษยางรถยนต์ (Yadav et al., 2016)



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบเปียก-แห้งกับน้ำหนักที่สูญเสีย (Yadav et al., 2016)

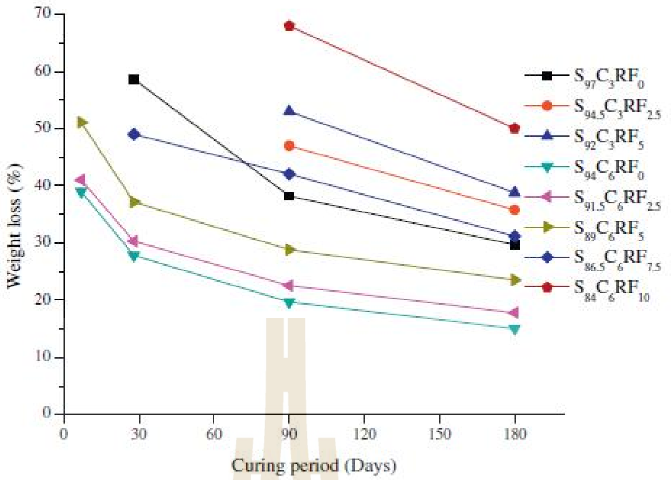
ต่อมา Yadavand Tiwari (2017) ได้ศึกษาการปรับปรุงดินซีเมนต์โดยการใช้วัสดุเศษยางที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นยางชนิดที่แตกต่างออกไปจากงานวิจัยของ Yadav et al. (2016) จากผลการศึกษาดังกล่าวพบว่าเมื่อผสมเศษยางจากโรงงานอุตสาหกรรมลงไปในดินซีเมนต์นั้นโดยใช้แทนที่น้ำหนักของดินซีเมนต์จะเพิ่มคุณสมบัติให้มีพฤติกรรมหยืดหยุ่นได้ดีกว่าแบบไม่ผสมยาง

จากโรงงานอุตสาหกรรม ในด้านรับกำลังอัดและความคงทนในรอบเปียก-แห้ง นั้นจะมีคุณสมบัติที่ไม่ดีเท่าดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมเศษยางจากโรงงานอุตสาหกรรม สังเกตจากรูปที่ 2.16b เมื่อเติมซีเมนต์ลงไปผสมกับดินในอัตราส่วนที่มากขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงดึงทางอ้อมแบบผ่าซีกเพิ่มขึ้น $S_{97}C_3RF_0$ คือปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3 ของน้ำหนักดิน $S_{94}C_6RF_0$ คือ ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 6 ของน้ำหนักดิน และรูปที่ 2.16c เมื่อเติมปริมาณยางจากโรงงานอุตสาหกรรมกับดินซีเมนต์ พบว่าปริมาณยางจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เหมาะสมจะส่งผลให้กำลังรับแรงดึงทางอ้อมแบบผ่าซีกเพิ่มขึ้น $S_{91.5}C_6RF_{2.5}$ คือปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 6 ของน้ำหนักดินและปริมาณยางจากโรงงานอุตสาหกรรม 2.5 ของน้ำหนักดิน จากรูปที่ 2.17 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบเปียก-แห้งกับน้ำหนักที่สูญเสีย เมื่อผสมยางจากโรงงานอุตสาหกรรม ($S_{91.5}C_6RF_{2.5}$)เข้ากับดินซีเมนต์จะส่งผลให้อัตราการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมยางจากโรงงานอุตสาหกรรม ($S_{94}C_6RF_0$) เนื่องจากพฤติกรรมการยึดเกาะระหว่างเม็ดดินกับยางจากโรงงานอุตสาหกรรมยึดเกาะกันไม่ดีนัก เนื่องจากยางจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้นไม่สามารถเป็นเนื้อเดียวกับเม็ดดินหรือแทรกตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้จึงทำให้การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมยางจากโรงงานอุตสาหกรรมสูญเสียน้ำหนักมากกว่าตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมยางจากโรงงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (Strain) กับกำลังรับแรงดึงทางอ้อมแบบผ่าซีก (Split tensile stress) รูป a คือส่วนผสมของดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมยางจากโรงงานอุตสาหกรรม รูป b คือส่วนผสมของดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมยางจากโรงงานอุตสาหกรรม (Yadavand Tiwari, 2017)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบเปียก-แห้งกับน้ำหนักที่สูญเสีย (Yadav and Tiwari, 2017)

จากงานวิจัยข้างต้นจะพบว่าการศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติยังไม่เป็นที่แพร่หลายในปัจจุบัน จึงเป็นวัตถุประสงค์ในการศึกษางานวิจัยนี้

2.7 มาตรฐานข้อกำหนดในการออกแบบดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ

โดยอ้างอิงจาก สำนักงานวิเคราะห์และตรวจสอบ เรื่องเสนอข้อกำหนดพิเศษดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ (Specification of Natural Rubber Modified Soil Cement Base Course)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.6 ข้อกำหนดคุณสมบัติดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ

คุณสมบัติ	กรณีใช้เป็นพื้นทางดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ	กรณีใช้เป็นผิวทางจราจรดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ
1. C.B.R. (ทล.-ท.109/2517)	-	ไม่น้อยกว่า 30 % (หรือที่กำหนดไว้ในแบบ)
2. กำลังรับแรงอัด Unconfined compressive strength (ทล.-ท.105/2515,ASTM D2166)	ไม่น้อยกว่า 17.5 ksc. (250 psi.)	ไม่น้อยกว่า 17.5 ksc. (250 psi.)
3. กำลังรับแรงดึงทางอ้อม Indirect Tensile Strength (ITS)	มีค่าเพิ่มขึ้นไม่น้อยกว่า 3% เมื่อเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่เติมยางพารา	มีค่าเพิ่มขึ้นไม่น้อยกว่า 5% เมื่อเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่เติมยางพารา
4. ค่าโมดูลัสคืนตัว Resilient Modulus (RM)	มีค่าเพิ่มขึ้นไม่น้อยกว่า 10% เมื่อเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่เติมยางพารา	มีค่าเพิ่มขึ้นไม่น้อยกว่า 10% เมื่อเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่เติมยางพารา
5. ค่าความต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากความล้า Fatigue Resistance	มีค่าเพิ่มขึ้นไม่น้อยกว่า 80% เมื่อเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่เติมยางพารา	มีค่าเพิ่มขึ้นไม่น้อยกว่า 80% เมื่อเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่เติมยางพารา
6. ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Water Permeability, (ASTM D 2434)	มีค่าเพิ่มขึ้นไม่น้อยกว่า 5% เมื่อเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่เติมยางพารา	มีค่าเพิ่มขึ้นไม่น้อยกว่า 5% เมื่อเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่เติมยางพารา

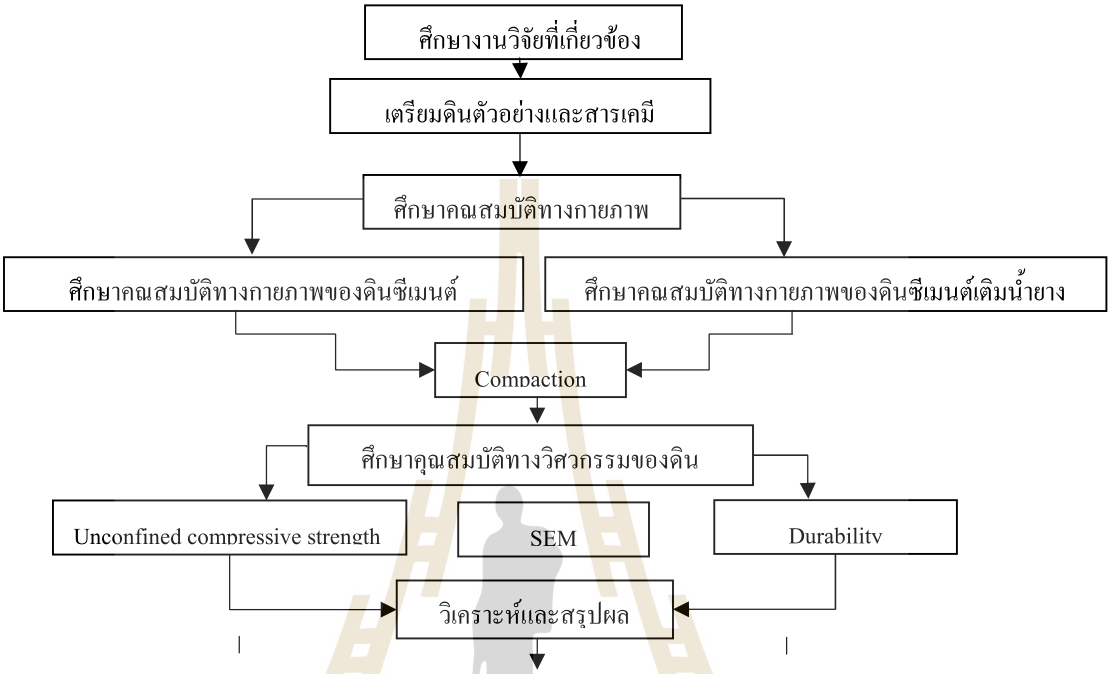
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นหาความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการบดอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำน้ำยางพาราในแต่ละอัตราส่วนของน้ำน้ำยางพารา โดยการทดสอบจะใช้การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ASTM D1557) เพื่อหาปริมาณน้ำเหมาะสมที่ทำให้เกิดความหนาแน่นแห้งสูงสุด จากนั้นทำการแทนที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสมด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติในอัตราส่วนแตกต่างกันไป นำตัวอย่างบ่มด้วยการห่อด้วยถุงพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นในระหว่างอายุบ่ม จนกระทั่งถึงอายุบ่มที่ 7 วัน จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (ASTM D2166) ด้วยความเร็วการกด 1 มิลลิเมตรต่อนาที และความทนทานต่อสภาวะเปียก-แห้ง (ASTM D559-03) การศึกษาวิจัยในครั้งนี้จะเลือกศึกษาเฉพาะอิทธิพลของดินซีเมนต์เมื่อปริมาณน้ำน้ำยางพารามีผลต่อพฤติกรรมการรับกำลังอัดแกนเดียวและพฤติกรรมความคงทนในรอบเปียก-แห้ง และคุณสมบัติพื้นฐานของดินซีเมนต์ เท่านั้น

3.2 การดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง

ศึกษาอิทธิพลของดินตัวอย่างทางกายภาพ	
1.Liquid Limit, Plastic Limit, Specific Gravity and Sieve analysis Test (ดิน 1 ชนิด x1 ตัวอย่าง x 4 การทดลอง)	4 ตัวอย่าง
ศึกษากลไกลักษณะการบดอัดดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ผสมน้ำน้ำยางพารา	
2.Compaction Test (ดิน 1 ชนิด x 6 ส่วนผสม x1 ตัวอย่าง x 1 การทดลอง)	6 ตัวอย่าง
ศึกษากลไกลักษณะการรับกำลังอัดแกนเดียวดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ผสมน้ำน้ำยางพารา	
3.Unconfined compressive strength Test (ดิน 1 ชนิด x 6 ส่วนผสม x3 ตัวอย่าง x 1 การทดลอง)	18 ตัวอย่าง
ศึกษากลไกลักษณะความทนทานต่ออายุการใช้งานในด้านเปียก-แห้งของดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ผสมน้ำน้ำยางพารา	
4.Durability Test (ดิน 1 ชนิด x 6 ส่วนผสม x12 ตัวอย่าง x 1 การทดลอง)	72 ตัวอย่าง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3 เตรียมดินตัวอย่างและสารเคมี

ดินลูกรังที่ใช้ในการวิจัยได้จากจังหวัดนครราชสีมา บริเวณตำบลโครกกรวด ที่ความลึกประมาณ 2-3 เมตรจากผิวดิน การเตรียมตัวอย่างจะใช้ดินที่ไม่ผสมปูนซีเมนต์มาทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพทั่วไป เช่น

1) ความถ่วงจำเพาะของดินเม็ดละเอียด (ขนาดเล็กกว่า 475 มิลลิเมตร) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D854

2) การวิเคราะห์ขนาดคละของเม็ดดินโดยใช้ตะแกรงร่อน (Sieve analysis) ทดสอบโดยการร่อนตะแกรงแบบล้างตามมาตรฐานของ ASTM D 422

3) การวิเคราะห์ขนาดเม็ดดินโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 422-62

4) การหาขีดจำกัดเหลว (Liquid limit, LL) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318

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

หลังจากนั้นนำดินตัวอย่างมาทำการบดอัดโดยเติมปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 3 ของน้ำหนักดินเพื่อเปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำน้ำยางพาราในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งมากสูงสุด ($\gamma_{d\ max}$) ในแต่ละอัตราส่วนของส่วนผสม (ASTM D1557-70) เมื่อทราบค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{d\ max}$) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (w_{opt}) แล้วจึงนำมาเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์ที่อัตราส่วนน้ำน้ำยางพาราต่างๆเพื่อทดสอบกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 7 วันตามมาตรฐานของกรมทางหลวง (ทล.-ท 105/2515) และทดสอบความทนทานต่ออายุการใช้งานด้านเปียก-แห้ง ที่อายุบ่ม 28 วัน (ASTM D559-03)

3.4 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนประเภทที่ 1 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมคิดเป็นร้อยละ 3 ของน้ำหนักดินแห้ง

3.5 น้ำยางพาราธรรมชาติ

น้ำยางพาราธรรมชาติที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นน้ำยางพาราธรรมชาติ ที่ได้รับจากศูนย์บริการทดสอบรับรองภาคกลางฝ่ายวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางการยางแห่งประเทศไทยมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีตามตารางที่ 3.2 ปริมาณน้ำยางพาราธรรมชาติที่ใช้ในการผสมคิดเป็นอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณน้ำยางพาราธรรมชาติที่ 100:0, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25 และ 70:30 ทำการผสมที่ความชื้นเหมาะสมสำหรับดินซีเมนต์บดอัด

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำยางพาราธรรมชาติเปรียบเทียบกับข้อกำหนดการใช้น้ำยางพาราในคู่มือปฏิบัติงานการควบคุมคุณภาพและการรับรองมาตรฐานวัสดุ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

รายการที่	คุณสมบัติ	หน่วย	เกณฑ์กำหนด	ผลการทดสอบ
1	การกระจายตัวในน้ำ	-	กระจายตัวในน้ำได้ดี	กระจายตัวในน้ำได้ดี
2	สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content, TSC)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)	< 35	32
3	ปริมาณเนื้อยางธรรมชาติ (Natural rubber content) ด้วยการทดสอบการเปลี่ยนน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric TGA)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)	≥ 30	30
4	ความหนืด (viscosity)	เซนติพอยส์	< 50	47
5	ความเป็นกรด-ด่าง (pH)		>9	13

3.6 การบดอัดดิน Compaction อ้างอิงจาก ASTM D1557

การทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) มทช. (ท) 501.2-254 เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นของดิน กับปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัดในแบบที่กำหนดขนาดไว้ด้วยตุ้มเหล็กหนัก 4.54 กก. (10 ปอนด์) ระยะปล่อย ตุ้มตกกระทบสูง 457 มม. (18 นิ้ว)

วิธีทดสอบ มี 4 วิธี ต่าง ๆ กันดังนี้

วิธี ก. ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม. (4 นิ้ว) และดินที่ร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) ตามวิธีพร๊อกเตอร์แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor)

วิธี ข. ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มม. (6 นิ้ว) และดินที่ร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) ตาม วิธีแอสโต ที 180 (AASHTO T 180)

วิธี ค. ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม. (4 นิ้ว) และดินที่ร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) ตามวิธีพร๊อกเตอร์แบบสูงกว่ามาตรฐาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิธี ง. ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มม. (6 นิ้ว) และดินที่ร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) ตามวิธีแอสโต ที 180

3.6.1 ขั้นตอนวิธีการทำการทดสอบ เครื่องมือและอุปกรณ์

แบบ (MOLD) ทำด้วยโลหะมีลักษณะทรงกระบอกกลวง ผนังแข็งแรงมี 2 ขนาด มีปลอกที่สามารถถอดได้สูง 60 มม. (2 3/8 นิ้ว) เพื่อให้สามารถบดอัดดินให้สูง และมีปริมาตรตามต้องการ แบบและปลอกต้องยึดกันได้อย่างมั่นคงกับฐานแบบซึ่งสามารถถอดได้

แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม. (4 นิ้ว) สูง 116.43±0.127 มม.(4.584±0.005 นิ้ว) มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแบบ 101.6±0.406 มม. (4.000±0.016 นิ้ว) โดยมี ขนาดความจุ 0.000943±0.000008 ลบ.ม. (0.0333±0.0003 ลบ.ฟ.) และมีปลอกขนาดเดียวกันสูง 60 มม. ($2\frac{3}{8}$ นิ้ว)

แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มม. (6 นิ้ว) สูง 116.43± 0.127 มม. (4.584±0.005 นิ้ว) มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแบบ 152.4 ± 0.6604 มม.(6.000±0.026 นิ้ว) โดยมีความจุ 0.002124± 0.000021 ลบ.ม. (0.07500± 0.00075 ลบ.ฟ.) และมีปลอกขนาดเดียวกันสูง 60 มม. ($2\frac{3}{8}$ นิ้ว)

ตุ้ม (HAMMER) ทำด้วยโลหะทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8±0.127 มม. (2.000±0.005 นิ้ว) น้ำหนักรวมทั้งด้ามถือ 2.5359±0.0081 กก. (10.00±0.02 ปอนด์) มีปลอกบังคับให้ยกได้สูง 457.2±1.524 มม. (18.00±0.06 นิ้ว) เหนือระดับดินที่บดอัดโดยตุ้มตกลงกระทบได้อย่างอิสระ ปลอกบังคับต้องมีรูระบายอากาศอย่างน้อย 4 รู มี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 9.5 มม. ($\frac{3}{8}$ นิ้ว) ทำมุมกัน 90 องศา และห่างจากปลายปลอกทั้งสองข้างประมาณ 19 มม. ($\frac{3}{4}$ นิ้ว)

เครื่องดันตัวอย่างออกจากแบบ (Sample extruder) ประกอบด้วยแม่แรง (Jack) ก้านโยกแม่แรง โครงเหล็กจับแบบขณะดันตัวอย่างออกจากแบบ ใช้ดันตัวอย่างที่ บดอัดในแบบแล้วออกจากแบบ หรืออาจใช้เครื่องมืออย่างอื่น ที่สามารถขุดแคะตัวอย่างดินออกจากแบบก็ได้

เครื่องชั่ง (Balance and scale) สามารถชั่งน้ำหนักได้อย่างน้อย 11.5 กก. และอ่านละเอียดได้ถึง 5 กรัม 1 เครื่อง และสามารถชั่งน้ำหนักได้อย่างน้อย 1,000 กรัม อ่านละเอียดได้ถึง 0.01 กรัม อีก 1 เครื่อง

ตู้อบ (Oven) สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ 110±5 องศาเซลเซียส (230±9 องศาฟาเรนไฮต์) สำหรับอบดินชื้นให้แห้ง

เหล็กปาดดิน (Strainght edge) ทำด้วยเหล็กชุบแข็ง (Hardened steel) มีขอบเรียบยาวไม่น้อยกว่า 254 มม. (10 นิ้ว) มีขอบที่ลบมุมด้านหนึ่ง อีกด้านหนึ่งเรียบ ตรงตลอดความยาวของ

เหล็กปาดดิน โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 0.1 (0.01 นิ้วต่อความยาว 10 นิ้ว) ในช่วงที่ใช้ปาดแต่งผิวดินในแบบ

ตะแกรงร่อนดิน (Sieve) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 203 มม. (8 นิ้ว) สูง 50.8 มม. (2 นิ้ว) มี 2 ขนาด คือ 19.0 มม. ($\frac{3}{4}$ นิ้ว) และ 4.75 มม. (เบอร์ 4)

เครื่องผสมดิน (Mixing tool) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการคลุกผสมดินให้เข้ากัน ได้แก่ ถาดใส่ดิน ช้อนตักดิน พลั่ว เกรียง ถ้วยตวงวัดปริมาตรน้ำ เป็นต้น หรืออาจเป็นเครื่อง ผสมดินที่ทำงานด้วยเครื่องจักร ซึ่งสามารถคลุกเคล้าผสมตัวอย่างดินให้เข้ากับน้ำที่ผสมเพิ่มลงไปในตัวอย่างดินทีละน้อย ๆ ได้

ตลับบรรจุดิน (Container) ทำด้วยโลหะมีฝาปิดป้องกันความชื้นระเหยออกไปก่อนชั่งน้ำหนัก หรือระหว่างการชั่งน้ำหนักเพื่อหาความชื่นในดิน

3.6.2 การเตรียมตัวอย่าง

ถ้าตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบมีความชื้นให้ผึ่งให้แห้งโดยอากาศ จนสามารถใช้เกรียงบดให้ร่วนได้หรือใช้ตู้อบอบดินให้แห้งก็ได้แต่ต้องใช้อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส (140 องศาฟาเรนไฮต์) แล้วบดให้เม็ดดินหลุดออกจากกัน โดยไม่ทำให้เม็ดดินแตก

ในกรณีที่ขนาดของตัวอย่างก้อนใหญ่ที่สุดโตกว่า 19.0 มม. ($\frac{3}{4}$นิ้ว) ร่อนเอาดินที่ค้างบนตะแกรงนี้ออกแล้วแทนด้วยดินที่ร่อนผ่านตะแกรงนี้แล้วค้างบนตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) จำนวนน้ำหนักเท่ากันใส่ลงแทนแล้วคลุกเคล้ากันให้ทั่วทำการแบ่งสี่ (Quartering) หรือใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง (Sample splitter)

ในกรณีที่จะทำการทดสอบตามวิธี ค. หรือ ง. ให้ใช้ตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) เท่านั้น ส่วนที่ค้างบนตะแกรงนี้ให้ทิ้งไป

ให้เตรียมตัวอย่างหนักประมาณ 6,000 กรัม (14 ปอนด์) สำหรับการทดสอบวิธี ข. และ ง. ต่อการทดสอบ 1 ครั้ง และหนักประมาณ 3,000 กรัม (7 ปอนด์) สำหรับการทดสอบ วิธี ก. และ ค. ต่อการทดสอบ 1 ครั้ง การเตรียมตัวอย่างต้องเตรียมให้พอทดสอบได้ไม่น้อยกว่า 4 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง

3.6.3 การทดสอบ

นำตัวอย่างดินที่เตรียมมาพรมน้ำให้ทั่วตัวอย่างดินเพื่อให้ดินชื้น โดยเมื่อคลุกผสมกันแล้วจะมีความชื้นตามปริมาณความชื้นที่ให้ความแน่นสูงสุด (Optimum moisture content) ร้อยละ 4 ใส่ดินที่ผสมน้ำแล้ว ลงในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม. (4 นิ้ว) ซึ่งมีปลอก (Collar) สวมอยู่เรียบร้อยแล้ว โดยประมาณว่าเมื่อบดอัด แล้วจะเหลือดินสูง $\frac{1}{5}$ ของความสูงของ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

แบบ แล้วบดอัดโดยตุ้มยกสูง 457 มม. (18 นิ้ว) จำนวน 25 ครั้งให้ทั่วผิวของดินในแบบซ้ำอีก 4 ครั้ง จนดินที่ถูกบดอัดแน่นในแบบมีความสูงกว่าแบบประมาณ 10 มม.

ถอดปลอกออก ใช้เหล็กปาดดินปาดแต่งหน้าดินในแบบให้เรียบเท่ากับระดับขอบบนของแบบ ถ้าดินก้อนใหญ่หลุดออกให้เติมดินตัวอย่างลงไปแทนแล้วบดให้แน่นพอควร จนเรียบ แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก เมื่อหักน้ำหนักของแบบเหล็กออก จะได้น้ำหนักของดินชื้น ต้องอ่านเครื่องชั่งละเอียดถึง 5 กรัม

แกะดินออกจากแบบ แล้วผ่าตามแนวตั้งผ่านจุดศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างดิน เก็บดินจากที่ผ่าประมาณ 300 กรัม ใส่ตลับบรรจุดินชั่งน้ำหนักทันที อ่านละเอียดถึง 0.01 กรัม

นำดินในตลับบรรจุดินไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส (230±9 องศาฟาเรนไฮต์) อย่างน้อย 12 ชั่วโมง แล้วชั่งหาน้ำหนักอ่านละเอียดถึง 0.01 กรัม

บดดินตัวอย่างที่แกะออกจากแบบที่เหลือให้ร่วน แล้วคลุกผสมกับดินในตอนแรกให้เข้ากัน พรมน้ำให้ความชื้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 1 ถึง 2

เพิ่มน้ำทุกครั้งจนกว่าน้ำหนักดินที่บดอัดในแบบลดลง หรือไม่เปลี่ยนแปลง หรืออาจลดน้ำที่ผสมลงเมื่อพบว่าการเพิ่มน้ำแล้ว น้ำหนักดินที่บดอัดในแบบกลับลดลง

การทดสอบวิธี ข. ดำเนินวิธีการทดสอบเช่นเดียวกับวิธี ก. แต่ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มม. (6 นิ้ว) บดอัด 3 ชั้น ๆ ละ 56 ครั้ง

การทดสอบวิธี ค. ดำเนินวิธีการทดสอบเช่นเดียวกับวิธี ก. แต่ใช้ตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) บดอัด 3 ชั้น ๆละ 25 ครั้ง

การทดสอบวิธี ง. ดำเนินวิธีการทดสอบเช่นเดียวกับวิธี ค. แต่ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มม. (6 นิ้ว) บดอัด 3 ชั้น ๆ ละ 56 ครั้ง

3.6.4 การคำนวณผลการทดสอบ

คำนวณหาค่าความชื้นในดินเป็นร้อยละ

$$W = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100 \tag{3.1}$$

เมื่อ W = ความชื้นในดินเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับน้ำหนักดินอบแห้ง

W_1 = น้ำหนักของดินชื้น หน่วยเป็นกรัม

W_2 = น้ำหนักของดินอบแห้ง หน่วยเป็นกรัม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำนวณหาค่าความแน่นชื้น (WET DENSITY)

$$\gamma_w = \frac{W}{V} \tag{3.2}$$

เมื่อ γ_w = ความแน่นชื้นของดิน หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

W = น้ำหนักดินชื้นที่บดอัดในแบบ หน่วยเป็นกรัม

V = ปริมาตรของแบบ ซึ่งเท่ากับปริมาตรของดินชื้นที่บดอัดในแบบหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

คำนวณหาค่าความแน่นแห้ง (Dry density)

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w}{1+\frac{w}{100}} \tag{3.3}$$

เมื่อ γ_d = ความแน่นแห้งของดิน หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

γ_w = ความแน่นชื้นของดิน หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

w = ความชื้นในดินเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับน้ำหนักดินอบแห้ง

3.7 การทดลองแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compression test) อ้างอิงจาก ASTM D1633

Unconfined compressive strength คือ ค่าแรงอัด (Compressive load) สูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ซึ่งแท่งตัวอย่างดินรูปทรงกระบอกหรือรูป Prismatic จะรับได้ ถ้าในกรณีที่ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ยังไม่ถึงค่าสูงสุด เมื่อความเครียด (Strain) ในแนวดิ่งเกิน 20 เปอร์เซ็นต์ ให้ใช้ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ ที่ความเครียด 20 เปอร์เซ็นต์นั้น เป็นค่า Unconfined compressive strength

การทดลองนี้ได้ปรับปรุงจาก AASHTO T 208 – 70 อธิบายถึงการหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดินในสภาพ Undisturbed และ Remolded อัตราการเพิ่มแรงอัดระหว่างการทดลอง จะควบคุมโดยความเครียด (Strain) หรือควบคุมโดยความเค้น (Stress) ก็ได้

3.7.1 ขั้นตอนวิธีการทำการทดสอบ เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องกด เป็นเครื่องใช้กดแท่งตัวอย่าง มีหลายแบบ เช่น ใช้ Dead weight หรือ Hydraulic เป็นแรงกดหรืออาจใช้เครื่องมือกดชนิดอื่นๆ ที่สามารถควบคุมอัตราเร็วของแรงกดและมีกำลังกดเพียงพอ สำหรับดินที่มีค่า Unconfined compressive strength น้อยกว่า 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (0.1 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร) ต้องใช้เครื่องกดที่สามรถอ่านค่าได้ระเอียดถึง 0.01 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (0.001 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร) และสำหรับดินที่มีค่า Unconfined compressive strength มากกว่า 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (0.1 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร) เครื่องกดจะต้องอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.05 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (0.005 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)โดยที่อัตราการกดเท่ากับ 1 มิลิเมตรต่อนาที

- เครื่องดันตัวอย่างดิน ใช้ดันแท่งตัวอย่างดินออกจากท่อบาง (Thin wall tube)
- Dial gauge ใช้วัดได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร หรือ 0.001 นิ้ว สามารถอ่านระยะทางเคลื่อนที่ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 ของความยาวแท่งตัวอย่างที่จะใช้ทดลอง
- Vernier caliper ใช้วัดขนาดของแท่งตัวอย่างโดยวัดได้ละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตร หรือ 0.01 นิ้ว
- นาฬิกาจับเวลา
- เตาอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ 110±5 องศาเซลเซียส
- เครื่องชั่งชนิดอ่านได้ละเอียดถึง 0.01 กรัม ใช้สำหรับตัวอย่างดินที่มีมวลน้อยกว่า 100 กรัมสำหรับ - ดินที่มีมวลมากกว่า 100 กรัม ให้ใช้เครื่องชั่งชนิดอ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม
- เครื่องมือเบ็ดเตล็ด เครื่องมืออื่นๆ ที่ต้องใช้ คือ เครื่องมือตัดและตกแต่งตัวอย่างเครื่องทำตัวอย่าง Remolded และ กระป๋องอบดิน
- วัสดุที่ใช้ประกอบการทดลอง เช่น ปูนปลาสเตอร์หรือ Hydro stone หรือ วัสดุอื่นที่มีคุณสมบัติคล้ายกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.7.2 การเตรียมตัวอย่าง

วิธีการเตรียมตัวอย่างนี้ครอบคลุมการพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์โดยใช้แบบหล่อทรงกระบอก วิธีการเตรียมตัวอย่างมี 2 วิธีดังนี้

วิธีที่ 1ขั้นตอนนี้ใช้ตัวอย่างทดสอบเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.0 นิ้ว (101.6 มม.) และความสูง 4.584 นิ้ว (116.4 มม.) อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 1.15 วิธีการทดสอบนี้จำเป็นต้องใช้เฉพาะกับวัสดุที่มีเม็ดดินที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 3⁄4 นิ้ว ขนาดช่องเปิด 19.0 มม. อย่างน้อยร้อยละ 30 หรือน้อยกว่าจึงเลือกใช้วิธีนี้ได้

วิธี 2 ขั้นตอนนี้ใช้ตัวอย่างทดสอบเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.8 นิ้ว (71.1 มม.) และความสูง 5.6 นิ้ว (142.2 มม.) อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2วิธีการทดสอบนี้จำเป็นต้องใช้เฉพาะกับวัสดุที่มีเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 นิ้ว ขนาดช่องเปิด 4.75 มม. จึงเลือกใช้วิธีนี้ได้

ในการตัดและแต่งปลายทั้งสองข้างของแท่งตัวอย่างถ้าหากมีเม็ดวัสดุที่ทำให้ผิวหน้าไม่เรียบก็ให้ปิดผิวหน้าด้วยปูนปลาสเตอร์โดยให้มีความหนาน้อยที่สุดหรือใช้ Hydrostone หรือวัสดุอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติคล้ายกันให้ชั่งหามวลของแท่งตัวอย่างก่อนและหลังการทดลองหาปริมาณน้ำในดินของแท่งตัวอย่าง โดยใช้ตัวอย่างทั้งแท่งหรือส่วนที่เป็นตัวแทนของแท่งตัวอย่าง

ตัวอย่าง Remolded นำตัวอย่างดิน Undisturbed เดิม มาทำดังนี้ นำตัวอย่างดินมาห่อด้วยแผ่นพลาสติกบางๆ แล้วใช้นิ้วขยำขยี้เพื่อให้ดินถูก Remold อย่างทั่วถึง ในการทำต้องระวังอย่าให้มีฟองอากาศเข้าไปปนในดินหลังจากนั้นก็อัดดินลงใน Mold ที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลมและมีขนาดตามที่ได้ระบุไว้ในวิธีการเตรียมตัวอย่างที่เลือกใช้เมื่อได้อัดดินใน Mold จนเต็มแล้วให้แต่งปลายแท่งตัวอย่างจนเรียบได้หน้าตัดตั้งฉากกับแกนตามความยาวของแท่งตัวอย่าง แล้วดันแท่งตัวอย่างออกจาก Mold และชั่งหามวลของแท่งตัวอย่าง ตัวอย่าง Remolded ที่ได้ จะต้องได้ดินเป็นเนื้อเดียวกัน มี Void ratio และปริมาณน้ำในดินใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ทำการบดอัดที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด

3.7.3 การทดสอบ

โดยวิธีควบคุมความเครียด (Strain)

วางแท่งตัวอย่างไว้ตรงกลางแผ่นกลมอันล่างของเครื่องกดแล้วเลื่อนจนแผ่นกลมอันบนของเครื่องกดแตะกับผิวบนของแท่งตัวอย่าง หมุนหน้าปัดของ Dial gauge ที่ใช้อ่านระยะทางของการกดให้เข็มชี้ที่ศูนย์ กดแท่งตัวอย่างด้วยอัตราเร็วคิดเป็นความเครียดในแนวดิ่ง 0.5-2 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที จดแรงกดและระยะยุบตัวของแท่งตัวอย่างทุกๆ 30 วินาที ในการใช้อัตราเร็วของความเครียดค่าใดจะต้องประมาณว่าระยะเวลาตั้งแต่เริ่มให้แรงกดจนถึงแรงกดสูงสุด จะต้องไม่เกิน 10 นาที เพิ่มแรงกดต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแรงกดลดลงในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้น หรือจนกระทั่งความเครียดมีค่า 20 เปอร์เซ็นต์ หาปริมาณน้ำในดินได้โดยนำแท่งตัวอย่างเข้าเตาอบ นอกจากกรณีที่ต้องเตรียมแท่งตัวอย่าง Remolded ก็ให้ใช้ส่วนของดินที่เป็นตัวแทนของแท่งตัวอย่างได้จากนั้นเขียนรูปสภาพแท่งตัวอย่างที่ทดลองเสร็จแล้ว ถ้าตัวอย่างมีรอยแตกร้าววัดมุมของรอยแตกร้าวเทียบกับแกนนอน

โดยวิธีควบคุมความเค้น (Stress)

ก่อนการทดลองให้ประมาณค่าแรงกดสูงสุดของค่าตัวอย่างวางแท่งตัวอย่างไว้ตรงกลางแผ่นกลมแผ่นล่างของเครื่องกดเลื่อนจนแผ่นกลมอันบนแตะกับผิวของแท่งตัวอย่างแล้ว

ตั้งศูนย์บนหน้าปัดที่ใช้อ่านระยะยุบตัวของแท่งตัวอย่าง ใช้แรงกดเริ่มแรกบนแท่งตัวอย่างเท่ากับ 1/15 – 1/10 ของแรงกดสูงสุดที่ได้ประมาณไว้แล้วทิ้งไว้ครึ่งนาทีแล้วอ่านระยะยุบตัวของแท่งตัวอย่างเพิ่มแรงกดต่อไป เท่ากับแรงกดแรกและทิ้งไว้ครึ่งนาทีเหมือนครั้งแรกทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้แรงกดสูงสุด หรือจนกระทั่งความเครียดมีค่าเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ ในระหว่างการเพิ่มแรงกด ถ้าสังเกตุว่าจะต้องใส่แรงกดมากกว่า 15 ครั้งหรือน้อยกว่า 10 ครั้ง เพื่อให้ได้แรงกดสูงสุดจะต้องรีบเปลี่ยนแรงกดแต่ละครั้งให้มากขึ้นหรือน้อยลงทันทีในการหาปริมาณน้ำในดินอาจหาได้จากดินทั้งแท่งที่ทดลองเสร็จแล้วหรือส่วนของดินที่เป็นตัวแทนแท่งตัวอย่างก็ได้ จากนั้นเขียนรูปสภาพแท่งตัวอย่างที่ทดลองเสร็จแล้ว ถ้าตัวอย่างมีรอยแตกร้าววัดมุมของรอยแตกร้าวเทียบกับแกนนอน

ดินที่อ่อนมากจะมีความเครียดไปจนถึงแรงกดสูงสุดมาก ดินชนิดนี้จึงต้องทดลองโดยใช้อัตราเร็วของความเครียดสูงสุดในทางตรงกันข้าม ดินที่แข็งหรือแตกง่ายซึ่งมีความเครียดไปจนถึงแรงกดสูงสุดน้อย ดินชนิดนี้จะต้องทดลองด้วยอัตราเร็วของความเครียดที่ต่ำกว่า

การประมาณค่านี้จะต้องมีประสบการณ์เพียงพอ มิฉะนั้นจะต้องใช้เครื่องกดอย่างเล็ก (Penetrometer) กดลงบนส่วนของตัวอย่างที่ไม่ได้ใช้ดู เพื่อหาค่านี้โดยประมาณ

3.7.4 การคำนวณผลการทดสอบ

- **คำนวณหาความเครียดในแนวดิ่ง** สำหรับแรงกดใด ๆ (£) **ได้โดยใช้สูตร**

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \qquad (3.4)$$

เมื่อ ΔL คือ ระยะยุบตัวของแท่งตัวอย่างที่แรงกดใด ๆ โดยอ่านค่าจาก Dial Gauge

L_0 คือ *ความ*ยาวเดิมของแท่งตัวอย่าง

- **คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยสำหรับแรงกดใด ๆ (A) ได้โดยใช้สูตร**

$$A = \frac{A_0}{1-\varepsilon} \qquad (3.5)$$

เมื่อ A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเดิมของแท่งตัวอย่าง

ε คือ ความเครียดตามแนวดิ่งที่แรงกดนั้น ๆ

- **คำนวณหาความเค้นสำหรับแรงกดใดๆ (σ_c) ได้โดยใช้สูตร**

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \tag{3.6}$$

เมื่อ **P** คือ แรงกด

A คือ พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยที่แรงกดนั้น ๆ

เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง σ_c และ ε โดยใช้ σ_c เป็นแกนตั้งและ £ เป็นแกนนอน จากกราฟสามารถหาค่าสูงสุดของ σ_c หรือค่า σ_c ที่ ε = **20 %** ได้

3.8 การทดสอบความทนทาน (Durability) โดยอ้างอิงจาก ASTM D559

มีอุปกรณ์และมีขั้นตอนในการทดสอบโดยสังเขป ดังนี้

1. นำดินที่ต้องการจะทดสอบไปบดอัดในแบบตามมาตรฐาน Modified Proctor ใช้โมล (Mold) ขนาด 4 นิ้ว x 4.6 นิ้วดินตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 102 มม. และความสูง 116.43 มม.
2. จากนั้นนำดินตัวอย่างที่ออกจากโมล (Mold) แล้วไปห่อในถุงไวนิลและเก็บไว้ในห้องควบคุมความชื้นของอุณหภูมิคงที่จนกระทั่ง 28 วัน
3. เมื่อครบอายุบ่ม 28 วันแล้วนำดินตัวอย่างแช่ในน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
4. ดินตัวอย่างจะถูกทำให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง
5. จากนั้นนำดินตัวอย่างออกมาทำให้แห้งในอากาศ 3 ชั่วโมง กระบวนการนี้เรียกว่ารอบ 1 เปียก-แห้งการตรวจสอบมวลของตัวอย่างนั้นดำเนินการโดยการชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่จุดสิ้นสุดของแต่ละรอบเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างก่อนการทดสอบ เปียก-แห้งหลังจากบรรลุเป้าหมาย เปียก-แห้งรอบ (0, 3 และ 6 รอบ)
6. ดินตัวอย่างถูกแช่ในน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิคงที่ 25 ± 2 ° C ก่อนการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength) จากนั้นทำการวัดกำลังอัดแกนเดียวและการลดน้ำหนัก จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength) ด้วยอัตราการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งที่ 1 มิลลิเมตรต่อนาที

3.9 การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM)

การศึกษาอิทธิพลของน้ำน้ำยางพาราธรรมชาติต่อโครงสร้างจุลภาคในดินซีเมนต์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลของ SEM ถูกพิจารณาเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างในระดับจุลภาคของการก่อตัวของเมทริกซ์ซีเมนต์และพอลิเมอร์เมทริกซ์ต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของการบดอัดซีเมนต์ดิน ชิ้นงานขนาดเล็กซึ่งได้คัดเลือกจากตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบหากำลังถูกนำมาขัดให้มีผิวเรียบ และแช่ในไนโตรเจนเหลวโดยอุณหภูมิแช่แข็งที่ -195 องศาเซลเซียสเพื่อหยุดการทำปฏิกิริยาของซีเมนต์ ก่อนเคลือบทองและใช้การตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงไปของสารประกอบที่เกิดปูนซีเมนต์ และผลิตภัณฑ์โพลิเมอร์ และนำการวิเคราะห์ทางเคมีมาเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการโพลิเมอร์ เพื่อให้ทราบถึงข้อแตกต่าง ของสารประกอบที่มีอยู่ในเมทริกซ์ซีเมนต์และพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Yaowarat 2018)

3.10 ข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบผสมดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติ

โดยอ้างอิงจาก สำนักงานวิเคราะห์และตรวจสอบ เรื่องเสนอข้อกำหนดพิเศษดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ (Specification of Natural Rubber Modified Soil Cement Base Course)

1) อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ น้ำ และปูนขาว ที่ใช้ผสมกับดินนั้น นายช่างผู้ควบคุมงานจะเป็นผู้กำหนดให้ที่หน้างาน และอาจสั่งเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับการทดลองหากำลังรับแรงอัดของแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์ ทั้งในห้องทดลองและจากการทำพื้นทางทดลองในสนาม

2) ในการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์เพื่อหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมกับดินและน้ำให้ถือเอาค่า Unconfined compressive strength ของแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ได้จากการทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท 105 "วิธีการทดลองหาค่า Unconfined compressive strength ของดิน " โดยอนุโลมซึ่งแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์ทดสอบจะถูกบดอัดในแบบตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.108 "วิธีการทดลอง Compaction test แบบสูงกว่ามาตรฐาน " ภายหลังการบ่มในถุงพลาสติกเพื่อมิให้ความชื้นเปลี่ยนแปลงนาน 7 วันแล้วนำแช่น้ำนาน 2 ชั่วโมง จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1724 กิโลพาสคัล หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบ

3) ปริมาณน้ำในดินที่ใช้การเตรียมแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์ เพื่อการทดสอบหากำลังแรงอัดตามวิธีการทดลองในข้อ 3.8.2 ให้ใช้ปริมาณน้ำในดินที่ Optimum moisture content ซึ่งได้จากการทดลองการบดอัดดินตามวิธีการทดลอง ทล.-ท.108 "วิธีการทดลอง Compaction test แบบสูงกว่า

มาตรฐาน "ปริมาณน้ำในดินปริมาณนี้ใช้เป็นแนวทางในการควบคุมการบดทับในสนามขณะทำการก่อสร้างพื้นทางดินซีเมนต์

หมายเหตุ หากต้องการหาปริมาณน้ำในดิน Optimum moisture content ที่แท้จริงของส่วนผสมดินซีเมนต์แล้ว ให้หาจากการทดลองบดอัดดินซีเมนต์ที่อัตราส่วนของปูนซีเมนต์จากส่วนผสมที่ให้กำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 1724 กิโลพาสคัล หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบตามข้อ 2 แล้วดำเนินการตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.108. "วิธีการทดลอง Compaction test แบบสูงกว่ามาตรฐาน" อย่างไรก็ดีปริมาณน้ำในดินที่ Optimum moisture content ซึ่งได้จากการบดอัดดินซีเมนต์ จะให้ค่าที่ไม่แตกต่างไปจากปริมาณน้ำในดินที่ Optimum moisture content ซึ่งได้จากการบดอัดดินตามข้อ 3 โดยวิธีการทดลองแบบเดียวกันมากนัก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

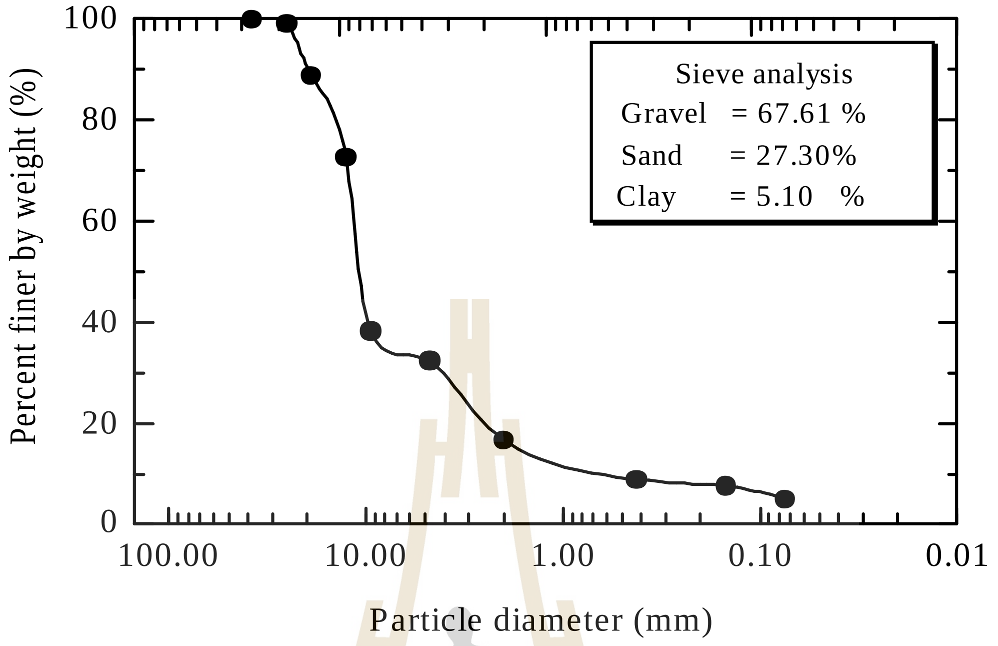
4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอการศึกษาพฤติกรรมการบดอัด กำลังอัดแกนเดียวและความทนทานต่ออายุการใช้งานของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติ เพื่อสร้างความเข้าใจถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุมกำลังอัดและความทนทาน (ปริมาณความชื้นที่จุดเหมาะสมของการบดอัด ปริมาณปูนซีเมนต์) และศึกษาโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติ

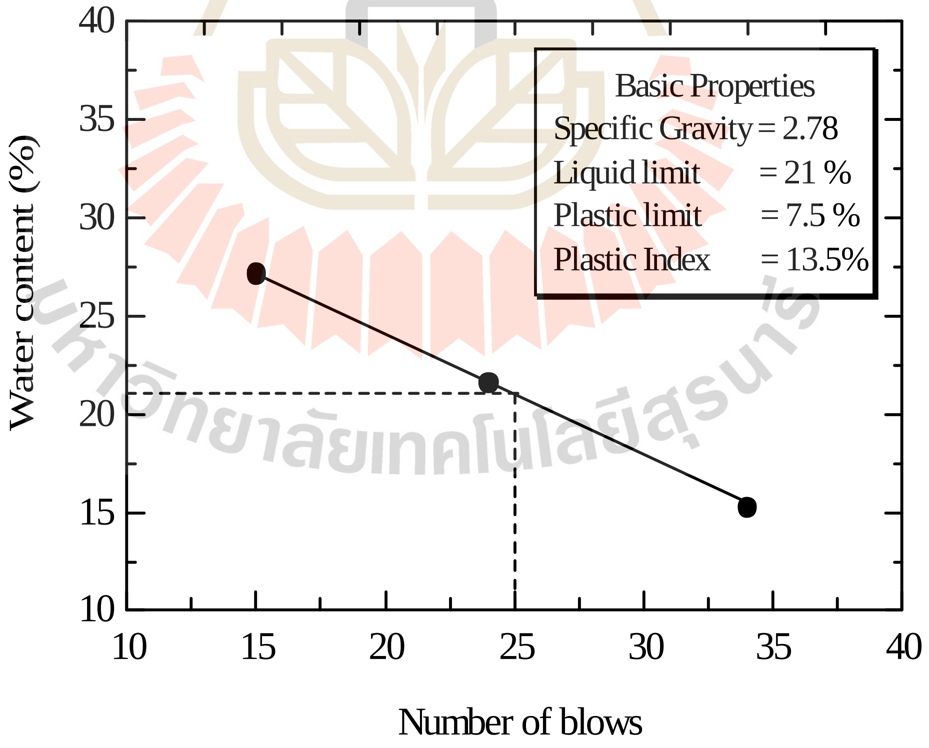
4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน ซีเมนต์ และน้ำยางพาราธรรมชาติ

ดินตัวอย่างทดสอบเป็นดินลูกรัง เก็บจากตำบลขามทะเลสอ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา มีอัตราส่วน กรวด : ทราย : ดินเหนียว เท่ากับร้อยละ 67.61 : 27.30 : 5.10 (รูปที่ 4.1) ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าเท่ากับ 2.78 ขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดพลาสติกและดัชนีสภาพพลาสติกมีค่าเท่ากับร้อยละ 21, 7.5 และ 13.5 ตามลำดับ (รูปที่ 4.2) Coefficient of uniformity (C_u) เท่ากับ 13.53 และCoefficient of Curvature (C_c) เท่ากับ 1.63 จัดเป็นดินประเภทกรวดผสมดินเหนียวที่มีขนาดคละกันดี (GW-GC) ตามระบบการจำแนกดินแบบเอกภาพ (USCS) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษา คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และน้ำยางพาราธรรมชาติได้จากการยางแห่งประเทศไทยจากคุณสมบัติทางกายภาพของดินตัวอย่าง พบว่าค่าดัชนีสภาพพลาสติกมีค่าเท่ากับร้อยละ13.5 ซึ่งเกินมาตรฐานการคัดเลือกวัสดุของกรมทางหลวงที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 11 แสดงดังตารางที่ 4.1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน



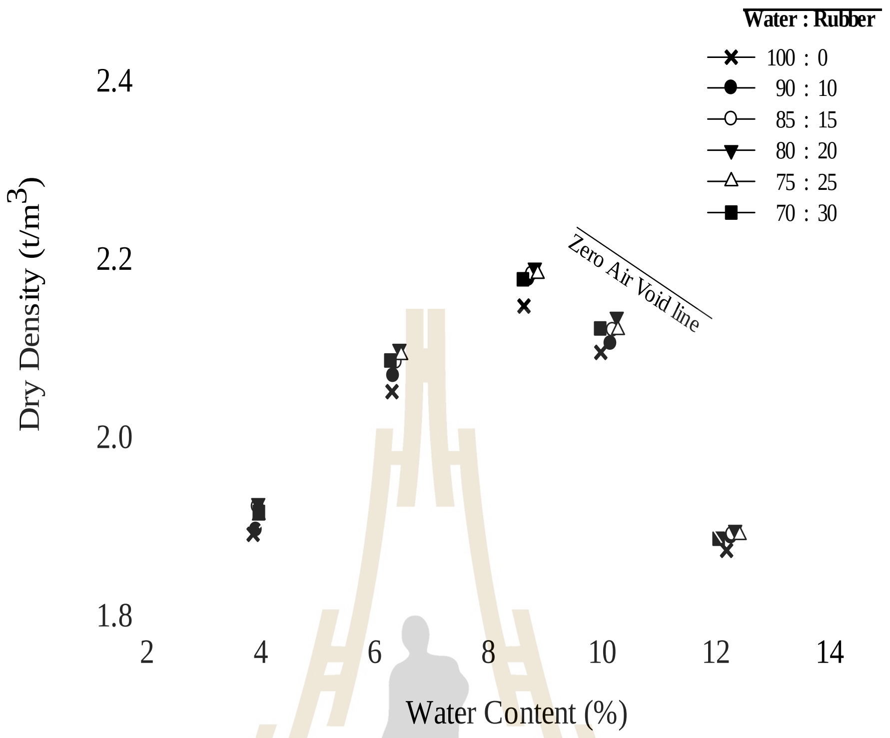
รูปที่ 4.2 ความถ่วงจำเพาะ ขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดพลาสติกและดัชนีสภาพพลาสติกของดิน

ตารางที่ 4.1 ค่าจากผลการทดสอบในงานวิจัยเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวง (ทล.-ม. 205)

มาตรฐานการคัดเลือกวัสดุในชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวง (ทล.-ม. 205)	มาตรฐานกำหนด	ผลการทดสอบของงานวิจัย
Los Angles Abrasion	< 60 %	42 %
Sieve Analysis	Type A, B, C, D	Type A
Liquid Limit	< 35 %	21 %
Plasticity Index	< 11 %	13.5 %

4.3 การบดอัดดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพารา

รูปที่ 4.3 แสดงผลทดสอบการบดอัดของดินซีเมนต์ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 3 ของน้ำหนักดินที่ใช้ในการบดอัดและดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติ ที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 100:0, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25 และ 70:30 ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) มีค่าเท่ากับ 2.148, 2.178, 2.184, 2.192, 2.184 และ 2.178 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ เห็นได้ว่าพฤติกรรมการบดอัดของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราในอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาตินั้น จะมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) เพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนร้อยละ 100:0 จนกระทั่งอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 80:20 หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำยางพาราธรรมชาติเป็นอัตราส่วนร้อยละ 75:25 และ 70:30 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงอย่างต่อเนื่องตามลำดับ ในขณะเดียวกันปริมาณความชื้นของทุกอัตราส่วนน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติที่ทำให้ได้ค่าบดอัดสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 8.6 ถึง 8.9 และสามารถกล่าวได้ว่าปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติที่ร้อยละ 80 : 20 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เกิดความหนาแน่นแห้งสูงสุด ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นตารางสรุปความหนาแน่นแห้งและปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ใช้ในการบดอัดของงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) กับปริมาณน้ำ เหมาะสมที่ใช้ในการบดอัด (Optimum water content) ในอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติต่าง ๆ

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) และปริมาณน้ำเหมาะสมที่ใช้ในการบดอัด (Optimum water content) ในอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติต่าง ๆ

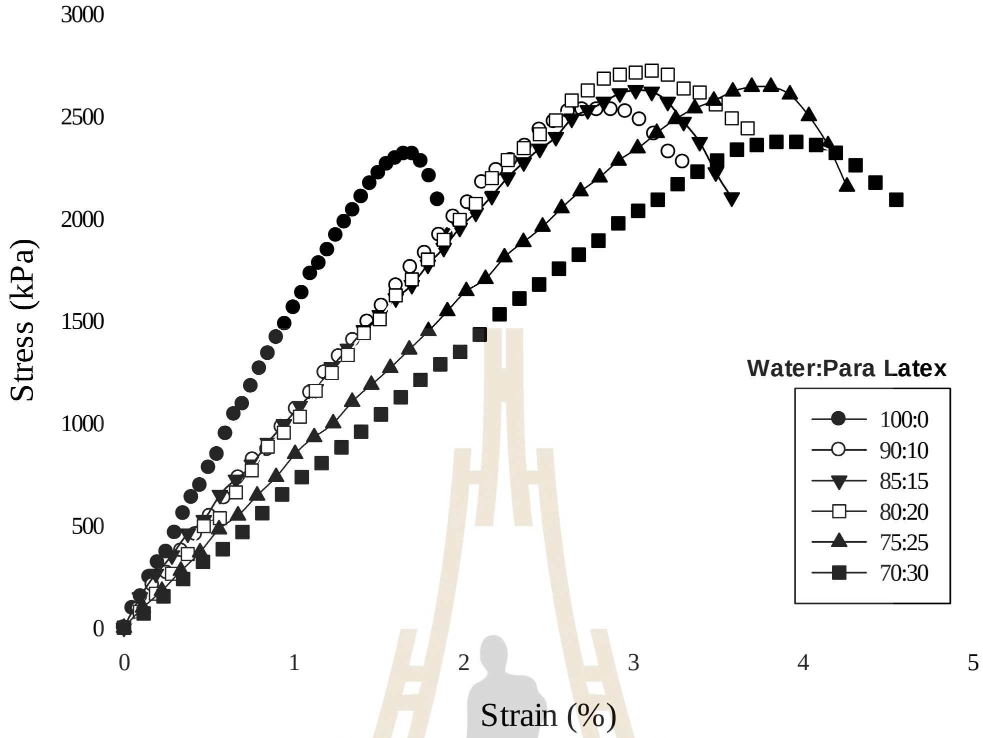
อัตราส่วน	Water content %	Dry density (t/m^3)
100 : 0	8.63	2.148
90 : 10	8.71	2.178
85 : 15	8.77	2.184
80 : 20	8.82	2.192
75 : 25	8.87	2.184
70 : 30	8.61	2.178

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.4 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดที่ผสมน้ำยางพารา

ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 3 ของน้ำหนักดินที่ใช้ในการบดอัด และดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติในอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 100:0, 90:10,85:15, 80:20, 75:25 และ 70:30 สามารถแสดงให้เห็นในรูป 4.4 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการรับกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราในอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาตินั้น มีค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfine compressive strength) เท่ากับ 2314.49, 2531.53, 2627.07, 2722.19, 2643.06 และ 2374.05 กิโลปลาสคัลสำหรับอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 100:0, 90:10,85:15, 80:20, 75:25 และ 70:30 ตามลำดับ เห็นได้ว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา จะมีค่ากำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนร้อยละ 100:0 จนกระทั่งอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 80:20 หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำยางพาราธรรมชาติเป็นอัตราส่วนร้อยละ 75:25 และ 70:30 ค่ากำลังอัดแกนเดียวลดลงอย่างต่อเนื่องตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Baghini (2014) เมื่ออัตราส่วนน้ำยางโคพอลิเมอร์ (Copolymer) เพิ่มขึ้นกำลังอัดแกนเดียวเพิ่มจนถึงจุดที่เหมาะสมหลังจากนั้นกำลังอัดแกนเดียวลดลงนอกจากนี้การผสมน้ำกับน้ำยางพาราธรรมชาติ ยังมีแนวโน้มช่วยเพิ่มความเครียดที่จุดวิบัติ (Failurestrain)ให้สูงขึ้นจากเดิม เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ไม่มีการปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติ แสดงให้เห็นในตารางที่ 4.3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



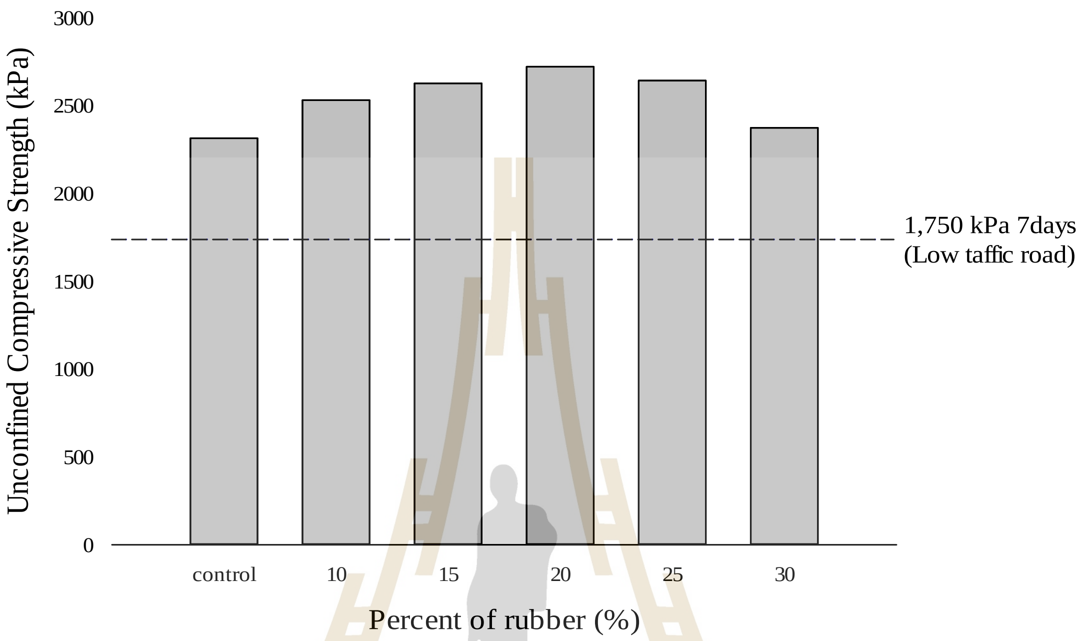
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าค่ากำลังอัดแกนเดียวและความเครียด

ตารางที่ 4.3 ค่ากำลังอัดแกนเดียวและความเครียดที่จุดวิบัติ

อัตราส่วน	Failure Strain (%)	Unconfined compressive strength (kPa)
100 : 0	1.70	2314.49
90 : 10	2.87	2531.53
85 : 15	3.02	2627.07
80 : 20	3.11	2722.19
75 : 25	3.69	2643.06
70 : 30	3.96	2374.05

เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength) ของดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติกับมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ม. 204/2556 ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.5 สามารถสรุปได้ว่า ทุกการอัตราส่วนการปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา

ผ่านข้อกำหนดกำลังอัดแกนเดียวตามมาตรฐานกรมทางหลวง ซึ่งตามมาตรฐานกำหนดความต้องการไว้ที่ 1,750 กิโลปาสคัล

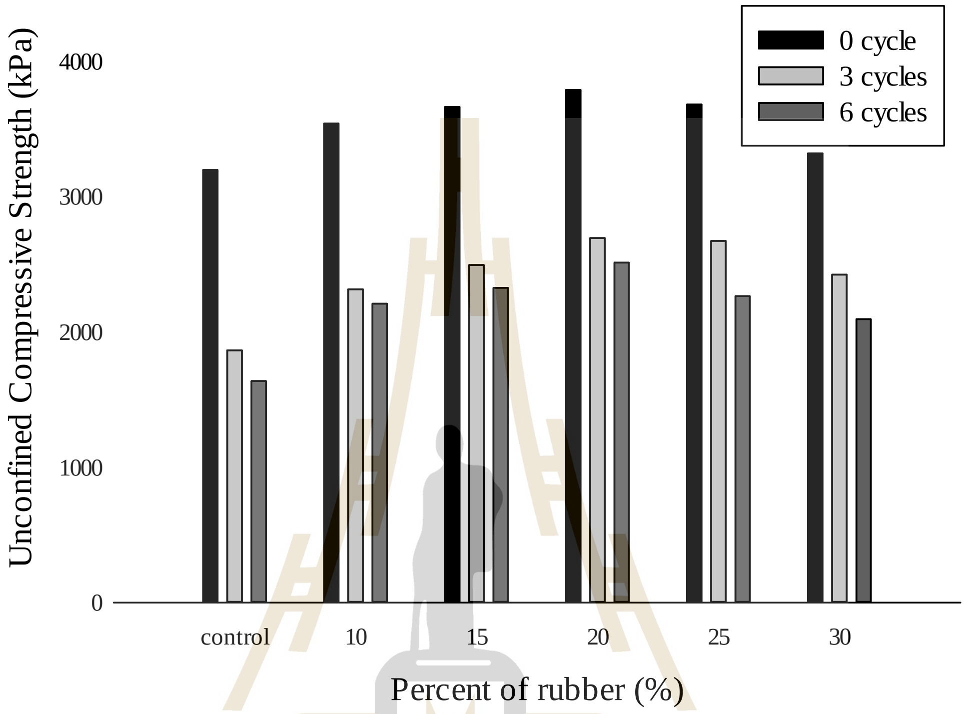


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณน้ำยางพาราธรรมชาติ

4.5 ความทนทานของดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางพารา

การทดสอบความทนทานของดินซีเมนต์ ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 3 ของน้ำหนักดินที่ใช้ในการบดอัดและดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติ ที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 100:0, 90:10, 85:15, 80:20,75:25 และ 70:30 กำลังอัดแกนเดียวของอายุใช้งานรอบเปียกแห้งที่ 0 รอบ มีค่าเท่ากับ 3,196.21, 3,538.65, 3,662.22, 3,787.72, 3,679.76 และ 3,318.96กิโลปลาสคัล ในขณะที่อายุใช้งานรอบเปียกแห้งที่ 6 รอบมีค่าลดลงเท่ากับ 1,636.46, 2,208.12, 2,325.5, 2,511.26, 2,264.22และ 2,093.35กิโลปลาสคัล ตามลำดับ เมื่อคิดเป็นร้อยละการสูญเสียกำลังรับกำลังอัดแกนเดียว มีค่าลดลงเป็นร้อยละ 48.80, 37.60, 36.50, 33.69, 38.47, 36.92 สำหรับอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 100:0, 90:10, 85:15, 80:20,75:25 และ 70:30 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังอัดแกนเดียวลดลงจากรอบที่ 0 ถึง 6 รอบมากที่สุดที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 100:0 ในทางตรงกันข้ามการลดลงของกำลังอัดแกน

เดียวที่น้อยที่สุด อยู่ที่ร้อยละ 80:20 ซึ่งจะให้กำลังอัดแกนเดียวสูญเสียน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุก ๆ อัตราส่วนของงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณน้ำยางพาราธรรมชาติที่อายุการใช้งานในรอบเปียก – แห้ง

ตารางที่ 4.4 ค่ากำลังอัดแกนเดียวและปริมาณน้ำยางพาราธรรมชาติ ในอายุการใช้งานรอบเปียก - แห้ง

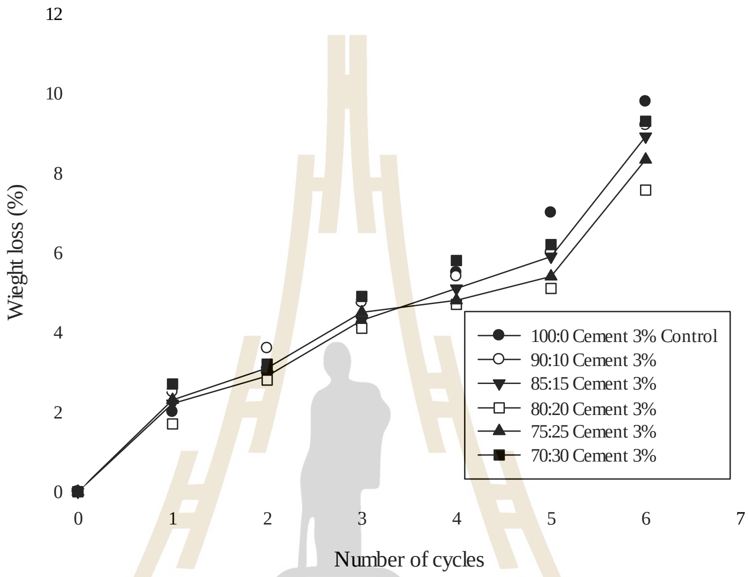
อัตราส่วน	อายุใช้งานรอบ เปียก - แห้ง	Unconfined compressive strength (kPa)	ร้อยละที่สูญเสียกำลังอัดที่ 0 ถึง 6 รอบ
100 : 0	0	3,196.21	0
	3	1,863.39	41.17
	6	1,636.46	48.80
90 : 10	0	3,538.65	0
	3	2,314.28	34.60
	6	2,208.12	37.60

ตารางที่ 4.4 ค่ากำลังอัดแกนเดียวและปริมาณน้ำยางพาราธรรมชาติ ในอายุการใช้งานรอบเปียก – แห้ง (ต่อ)

อัตราส่วน	อายุใช้งานรอบเปียก - แห้ง	Unconfined compressive strength (kPa)	ร้อยละที่สูญเสียกำลังอัดที่ 0 ถึง 6 รอบ
85 : 15	0	3,662.22	0
	3	2,493.97	31.90
	6	2,325.51	36.50
80 : 20	0	3,787.72	0
	3	2,693.07	28.90
	6	2,511.26	33.69
75 : 25	0	3,679.76	0
	3	2,671.50	27.40
	6	2,264.22	38.47
70 : 30	0	3,318.96	0
	3	2,422.84	27.00
	6	2,093.35	36.92

เมื่อเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 100:0, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25 และ 70:30 ตามลำดับ ที่อายุการใช้งานรอบเปียก-แห้งเริ่มต้น (0 รอบ) มีน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างอยู่ที่ 2103.74, 2120.78, 2126.47, 2135.93, 2127.41 และ 2115.10 กรัม ตามลำดับ เมื่อถึง 6 รอบของอายุการใช้งาน น้ำหนักของตัวอย่างจะลดลงไปเหลือเพียง 1897.79, 1925.76, 1936.97, 1974.30, 1950.14 และ 1918.50 กรัม ตามลำดับ เห็นได้ว่าเมื่อผ่านรอบของอายุการใช้งานเปียก-แห้งทั้งหมดจำนวน 6 รอบ มีการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ 205.96, 195.03, 189.49,161.63, 177.27และ 196.61กรัมตามลำดับ การสูญเสียน้ำหนักเมื่อเทียบเป็นร้อยละจะมีค่าเท่ากับ 9.790, 9.196, 8.911, 7.567, 8.333 และ 9.295 ตามลำดับ โดยค่าความคงทนต่อการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดอยู่ที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราร้อยละ 100:0 และความคงทนต่อการสูญเสียน้ำหนักจะมากขึ้นตามปริมาณน้ำยางพาราที่เพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งคงทนมากที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 80:20 จากนั้นตัวอย่างที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราร้อยละ 75:25 และ 70:30 มีการสูญเสียน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนร้อยละ 80:20 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

ในส่วนก่อนหน้านี้และงานวิจัยของ Yadav (2016) ผลการทดสอบความทนทานของดินซีเมนต์ผสมเศษยางรถยนต์พบว่าลักษณะการสูญเสียน้ำหนักในแต่ละอายุการใช้งานเปียกสลับแห้งนั้นสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งค่ากำลังอัดสูงสุดและค่าการลดลงของกำลังอัดแกนเดียวจากรอบที่ 0 ถึง 6 น้อยที่สุด อยู่ที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 80:20



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียและปริมาณน้ำยางพาราธรรมชาติที่อายุการใช้งานในรอบเปียก – แห้ง

ตารางที่ 4.5 แสดงอัตราการสูญเสียน้ำหนักและปริมาณน้ำยางพาราธรรมชาติ ในอายุการใช้งานรอบเปียก – แห้ง

อัตราส่วน	อายุใช้งานรอบเปียก - แห้ง	การสูญเสียน้ำหนัก (%)
100:0	1	2.01
	2	3.25
	3	4.19
	4	5.34
	5	7.00
	6	9.79

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.5 แสดงอัตราการสูญเสียน้ำหนักและปริมาณน้ำยางพาราธรรมชาติ ในอายุการใช้งานรอบเปียก – แห้ง (ต่อ)

อัตราส่วน	อายุใช้งานรอบเปียก - แห้ง	การสูญเสียน้ำหนัก (%)
90:10	1	2.50
	2	3.62
	3	4.76
	4	5.44
	5	6.23
	6	9.20
85:15	1	2.21
	2	2.93
	3	4.36
	4	5.12
	5	5.95
	6	8.92
80:20	1	1.70
	2	2.83
	3	4.12
	4	4.73
	5	5.10
	6	7.57
75:25	1	1.72
	2	2.84
	3	4.16
	4	4.78
	5	5.14
	6	7.56
70:30	1	2.71
	2	3.26
	3	4.87
	4	5.46
	5	6.33
	6	9.29

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.8 ตัวอย่างการสูญเสียน้ำหนักต่ออายุการใช้งานสภาวะเปียกสลับแห้งของดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วนน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 80:20 (A) และดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติ (B) ที่ 1 รอบอายุการใช้งาน

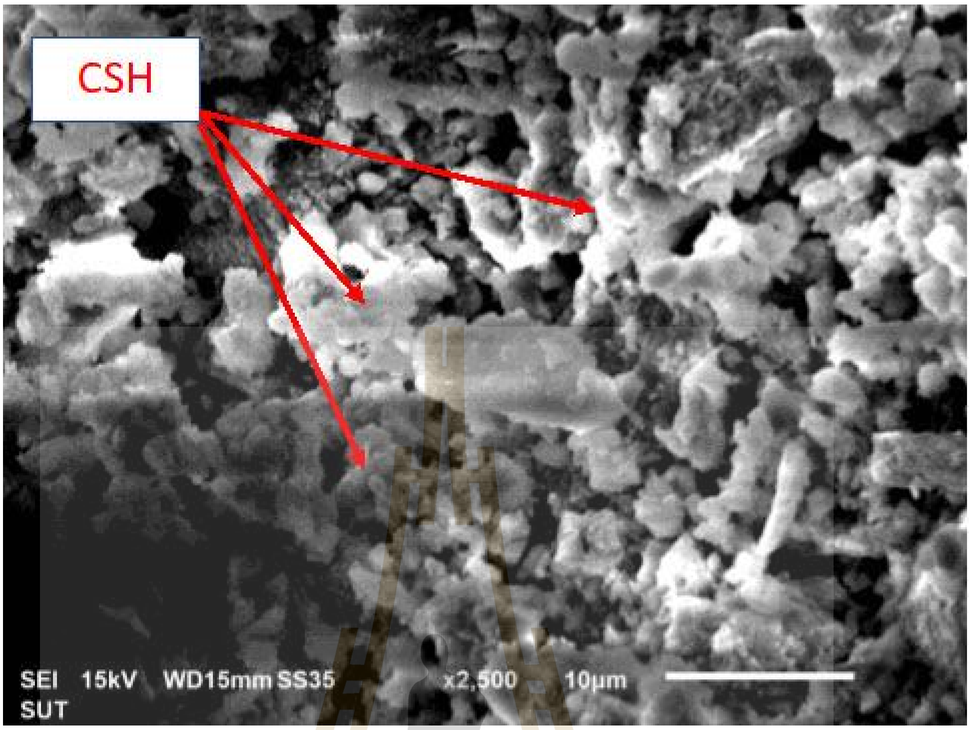
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.9 ตัวอย่างการสูญเสียน้ำหนักต่ออายุการใช้งานสภาวะเปียกสลับแห้งของดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วนน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 80:20 (A) และดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติ (B) ที่ 3 รอบอายุการใช้งาน

รูปที่ 4.10 ตัวอย่างการสูญเสียน้ำหนักต่ออายุการใช้งานสภาวะเปียกสลับแห้งของดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วนน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 80:20(A) และดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติ (B) ที่ 6 รอบอายุการใช้งาน

4.6 การวิเคราะห์ด้านโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางพารา

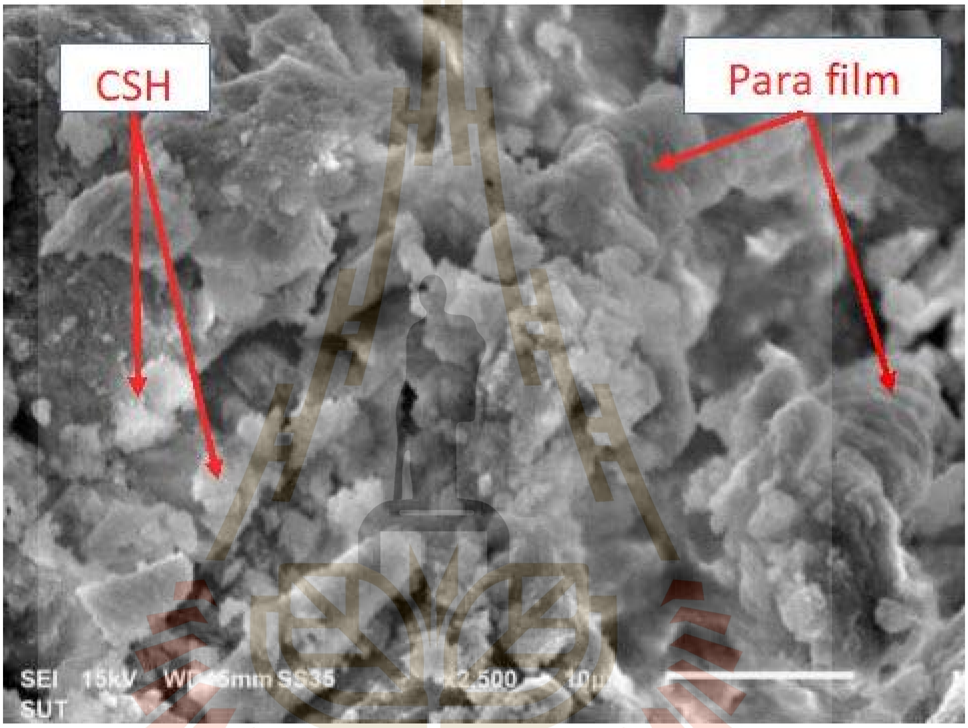
จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติซึ่งมีระยะเวลาการบ่ม 7 วัน ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 3 ของดินที่ใช้ในการบดอัด แสดงให้เห็นได้ว่า เมทริกซ์ของดินซีเมนต์เกิดจากผลิตภัณฑ์ที่มาจากซีเมนต์คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเพียงอย่างเดียว ซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นประกอบด้วย แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (CASH) จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่ากำลังอัดแกนเดียว (UCS) และความทนทานต่ออายุการใช้งานด้านเปียกสลับแห้งของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3 เกิดมาจากผลิตภัณฑ์ที่มาจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ซึ่งการใช้ซีเมนต์นั้นมีงานวิจัยออกมายืนยันอย่างมากมายว่า จะทำให้ดินมีความแข็ง (Stiffness) มากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันมีพฤติกรรมการแตกร้าวและเกิดรอยแยกในระดับจุลภาคจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Shrinkage cracking) มากขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติระยะเวลาการบ่ม 7 วัน ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 3

เมื่อเปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติที่ 80:20 จะเห็นได้ว่าเมทริกซ์ของดินตัวอย่างหนาแน่นขึ้น เนื่องจากมีการผสมน้ำยางพาราธรรมชาติ น้ำยางพาราธรรมชาติเมื่ออยู่ระดับจุลภาคจะมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์ม ซึ่งพบว่าแผ่นฟิล์ม (Para film) ที่ได้จากผลิตภัณฑ์น้ำยางพาราธรรมชาติจะช่วยลดการแตกร้าวในระดับจุลภาค (Micro crack) แผ่นฟิล์มจะเข้าแทรกซึมไปในช่องว่างระหว่างดินส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันแผ่นฟิล์มจะช่วยยึดรั้งและเพิ่มแรงโอบรัด (Confinement) ในเมทริกซ์ของดินส่งผลให้กำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้น เมทริกซ์ของดินที่ถูกแผ่นฟิล์มช่วยยึดรั้งจะเกิดการแตกร้าวได้ยากขึ้น ทำให้ความทนทานต่ออายุการใช้งานด้านเปียกสลับแห้งมากกว่าตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติ เนื่องจากการทดสอบความทนทานต่ออายุการใช้งานด้านเปียกสลับแห้งของดินซีเมนต์ที่ไม่มียางพาราจะส่งผลให้เกิดรอยแตกจากการหดตัวจากความร้อนในการทดสอบและการขยายตัวตอนแช่อยู่ในน้ำ (Shrinkage cracking) ดินตัวอย่างที่ไม่มียางพาราจะเริ่มมีการแตกร้าวในระดับโครงสร้างจุลภาคจนถึงระดับที่มีรอยร้าวขนาดใหญ่ที่ผิวของตัวอย่างทำให้สูญเสียน้ำหนักไปมากขึ้นเมื่อรอบเปียกสลับแห้งมากขึ้น การปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา

ธรรมชาติจะช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างเมทริกซ์ของดิน (Attaching ability) ทำให้กำลังอัดแกนเดียวดีขึ้น มีพฤติกรรมการวิบัติเป็นแบบวัสดุเหนียว ต้านทานการกร่อนและสึกหรอจากการทดสอบความทนทานต่ออายุการใช้งานด้านเปียกสลับแห้ง จึงเป็นเหตุผลในเรื่องของกำลังอัดแกนเดียวที่ลดลงน้อยที่สุดและการสูญเสียน้ำหนักจากอายุการใช้งานด้านเปียกสลับแห้งลดน้อยที่สุดอีกด้วย แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.12

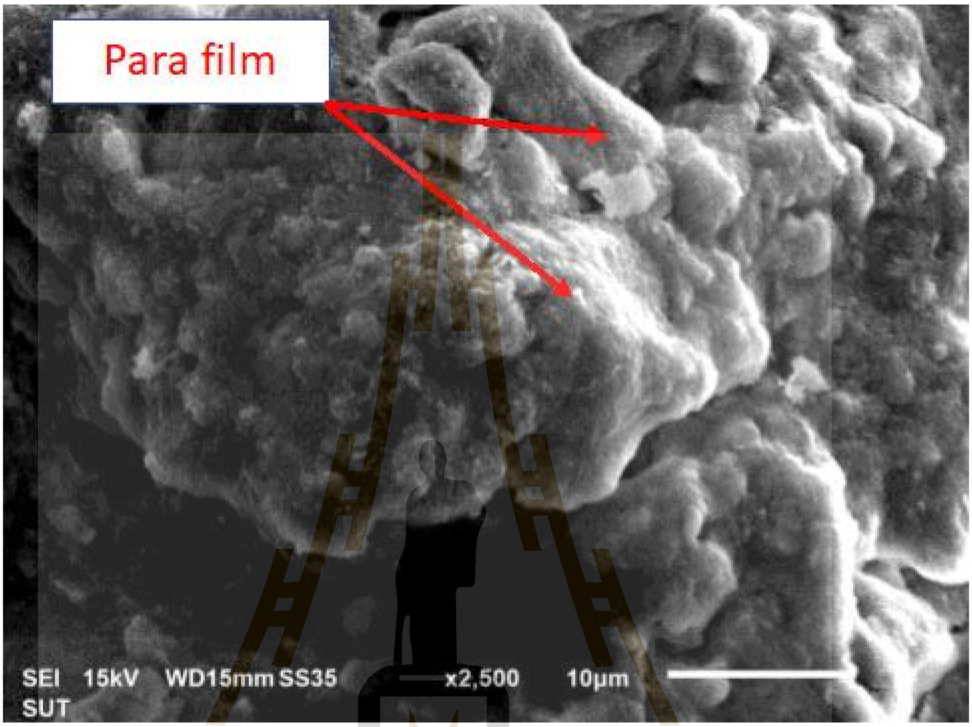


รูปที่ 4.12 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติที่อัตราส่วนเท่ากับ 80:20 มีระยะเวลาการบ่ม 7 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อมีการเพิ่มปริมาณยางพาราเกินอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดไปแล้ว เช่น อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราที่ 70:30 (รูปที่ 4.13) จะพบว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะถูกแทนที่ด้วยฟิล์มของน้ำยางพาราธรรมชาติที่มีมากขึ้น ส่งผลให้น้ำยางพาราธรรมชาติไปหยุดยั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น สังเกตได้จาก แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) จะไม่พบในรูปที่ 4.13 ความแกร่งและความแข็งแรงที่ได้จากผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ไฮเดรชั่นจะลดลงเนื่องจากถูกแทนที่ด้วยผลิตภัณฑ์จากน้ำยางพาราธรรมชาติ ซึ่งน้ำยางพาราธรรมชาติเป็นวัสดุประเภทมีความยืดหยุ่นสูงส่งผลให้เกิดพฤติกรรมการวิบัติแบบเหนียว (Ductility) มากกว่า

ดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติ ด้วยเหตุนี้ความสามารถในการรับกำลังอัดแกนเดียวและความแกร่งของวัสดุ (Stiffness) จึงลดน้อยลง



รูปที่ 4.13 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติที่อัตราส่วนเท่ากับ 70:30 มีระยะเวลาการบ่ม 7 วันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ศึกษาอิทธิพลของน้ำยางพาราธรรมชาติต่อกำลังรับแรงอัดและความทนทานของดินซีเมนต์พร้อมทั้งนำภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติ โดยการแทนที่ปริมาณน้ำยางพาราธรรมชาติเข้าไปในปริมาณน้ำเหมาะสมที่สุดของการบดอัด สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 พฤติกรรมการบดอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่ผสมน้ำยางพารา ในช่วงอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพารา ที่ทำให้เม็ดดินเชื่อมประสานกันได้ดีที่สุดคืออัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 80:20 ที่อัตราส่วนนี้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมากกว่าดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมน้ำยางพารา ซึ่งสามารถนำอัตราส่วนที่ได้จากการบดอัด นำไปออกแบบการวิจัย ทดสอบกำลังอัดแกนเดียว และทดสอบความคงทนของดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพาราต่อไปได้

5.1.2 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดที่ผสมน้ำยางพารา ความสามารถในการรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 80:20 อนุภาคระหว่างดินถูกหล่อลื่นดีขึ้นโดยการเติมน้ำยางพาราธรรมชาติทำให้เมทริกซ์ดินซีเมนต์อัดแน่นขึ้น ความแข็งแรงของเมทริกซ์ดินซีเมนต์บดอัดที่ผสมน้ำยางพารา มีผลมาจากการมีส่วนร่วมของการยึดรั้งจากแผ่นฟิล์มของน้ำยางพาราธรรมชาติและผลิตภัณฑ์ซีเมนต์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งทำให้กำลังรับแรงอัดและพฤติกรรมการวิบัติแบบยืดหยุ่นดีขึ้นมากกว่าดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติ

5.1.3 คุณสมบัติความคงทนของดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพารา ความสามารถในการรับแรงอัดแกนเดียวและการสูญเสียน้ำหนักของดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติในรอบอายุการใช้การเปียก-แห้งที่ 0 ถึง 6 รอบ อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อน้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 80:20 พบว่าเมทริกซ์ดินซีเมนต์ถูกเชื่อมประสานโดยแผ่นฟิล์มจากการเติมน้ำยางพาราธรรมชาติ เมื่อได้รับอุณหภูมิสูง ดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางพาราจะลดการเกิดการแตกร้าวและช่วยเพิ่มการยึดรั้งระหว่างเมทริกซ์ดิน ทำให้มีกำลังอัดและความทนทานมากขึ้น การมีส่วนร่วมของการยึดรั้งจากแผ่นฟิล์มของน้ำยางพาราธรรมชาติจะส่งผลให้การยึดรั้งระหว่างอนุภาคดินยังคงมีอยู่ทำให้มีกำลังอัดแกนเดียวและความทนทานได้ดีกว่าดินซีเมนต์

สรุปผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้ การนำดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติช่วยในด้านของกำลังอัดแกนเดียวได้ดีขึ้น สามารถปรับปรุงพฤติกรรมการวิบัติจากวัสดุเปราะเปลี่ยนพฤติกรรมการวิบัติเป็นแบบยืดหยุ่นได้ ความทนทานต่ออายุการใช้งานในด้านเปียกสลับแห้งได้ทนทานกว่าดินซีเมนต์ที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

กรมทางหลวง. (2560). ข้อกำหนดพิเศษที่ สว. พิเศษ 1/2560 สำหรับดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ. กรมทางหลวง.

กรมทางหลวง. (2556) มาตรฐาน ที่ ทล.-ม204/2556 มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์. กรมทางหลวง.

กรมทางหลวง. (2532) มาตรฐาน ที่ ทล.-ม205/2556 มาตรฐานพื้นทาง. กรมทางหลวง.

กรมทางหลวง. (2543) มาตรฐาน ที่ ทล.-ม213/2543การการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement recycling). กรมทางหลวง.

จตุรงค์ เสาวภาคย์ไพบูลย์, เดนนิส ที เบอร์กาโด และธนวรัท กฤตภัครพงษ์ (2553). “การเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ น้ำยาโพลิเมอร์เคมโรด.” บทความวิชาการวิศวกรรมโยธา.

ธิติพงศ์ หล่อพิศาลชัย และคณะ. (2556). การศึกษาคุณสมบัติทางด้านกำลังของดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพารา. มหาวิทยาลัยสยาม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา.

ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และสมบัติกระแส จรัสกร (2544). กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน. รายงานวิจัยฉบับที่ วพ.188 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวงกระทรวงคมนาคม. 160-163.

พีรวัฒน์ ปลาเงิน. (2557). การประยุกต์ใช้น้ำยางพาราและดินซีเมนต์พัฒนาสระน้ำต้านภัยแล้ง. มหาวิทยาลัยสยาม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย.

ระพีพันธ์ แดงต้นกี. (2559). ถนนต้นแบบยางพาราดินซีเมนต์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ASTM D559-12e1, Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org.

ASTM D1557-12e1, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft^3 (2,700 kN-m/m^3)), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org.

ASTM D1633-17, Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org.

Azzam, W. R. (2014). "Behavior of modified clay microstructure using polymer nanocomposites technique." Alexandria Engineering Journal53(1): 143-150.

Baghini, M. S., et al. (2016). "Performance evaluation of road base stabilized with styrene–butadiene copolymer latex and Portland cement." International Journal of Pavement Research and Technology9(4): 321-336.

C. A. Hogentogler, (A.M.ASCE), Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1937, Vol. 63, Issue 6, Pg. 1035-1056

Davidson, D.T. (1961). Soil Stabilization with Portland cement. Highway Research Board. Bulletin 292. 45-151.

Estabragh, A., et al. (2010). "Effect of resin on the strength of soil-cement mixture." Journal of Materials in Civil Engineering23(7): 969-976.

Herzog, A. and Mitchell, J.K. (1963). Reaction Accompanying the Stabilization of Clay with Cement. Highway Research Record. 36: 146-171.

Highway Research Board Committee on Soil-Cement Stabilization. (1959). Definition of Term Relating to Soil-Portland Cement Stabilization. Highway Research Abstracts, 29(6): 28-29.

Horpibulsuk, S., et al. (2006). "Strength development in cement stabilized low plasticity and coarse grained soils: Laboratory and field study." Soils and foundations46(3): 351-366.

Horpibulsuk, S., et al. (2010). "Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations." Construction and Building Materials24(10): 2011-2021.

Jamsawang, P., et al. (2014). "Flexural strength characteristics of compacted cement-polypropylene fiber sand." Journal of Materials in Civil Engineering27(9): 04014243.

Lambe, T.W., Michaels, A.S. and Moh, Z.C. (1959). Improvement of Soil Cement with Alkali Metal Compounds. Highway Research Board. Bulletin 241. 67-103.

Marto, A., et al. (2014). "Effect of non-traditional additives on engineering and microstructural characteristics of laterite soil." Arabian Journal for Science and Engineering39(10): 6949-6958.

Mills, W.H., Jr. (1935). Road Base Stabilization with Portland cement. Engineering News-Record, 115(22): 751-753.

Mills, W.H., Jr. (1936). Stabilizing soils with Portland cement, Experiments by South Carolina Highway Department. Highway Research Board Proceedings. 16: 322-347. 64

Moh, Z.C. (1965). Reaction of Soil Minerals with Cement and Chemicals. Highway Research Record. 86: 39-61.

Mirzababaei, M., et al. (2017). "Polymers for stabilization of soft clay soils." Procedia engineering189: 25-32.

Muhammad, B. and M. Ismail (2012). "Performance of natural rubber latex modified concrete in acidic and sulfated environments." Construction and Building Materials31: 129-134.

Muhammad, B., et al. (2012). "Influence of non-hydrocarbon substances on the compressive strength of natural rubber latex-modified concrete." Construction and Building Materials27(1): 241-246.

Naeini, S. A., et al. (2012). "Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer." KSCE Journal of Civil Engineering16(6): 943-949.

Nagaraj, T., et al. (1988). "Super-plasticized natural rubber latex modified concretes." Cement and Concrete Research18(1): 138-144.

Pendola, H.J., Kennady, T.W. and Hutson, W.R. (1969). Evaluation of Factors Affecting the Tensile Properties of Cement-Treated Materials. University of Texas at Austin Research Report. 98(3)

Rezaeimalek, S., et al. (2017). "Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization." Construction and Building Materials146: 210-220.

Tingle, J. S., et al. (2007). "Stabilization mechanisms of nontraditional additives." Transportation research record1989(1): 59-67.

Tingle, J. S. and R. L. Santoni (2003). "Stabilization of clay soils with nontraditional additives." Transportation research record1819(1): 72-84.

The Siam Cement Company Ltd. (1965). Demonstration Road Using Local Soil with Cement Stabilization. Bangkok. Thailand. Siam Cement. 25-26.

Wang, M.C. and Huston, M.T. (1972). Direct-Tensile Stress and Strain of Cement Stabilize Soil. Highway Research Record. 351: 19-24.

Wilmot, T.D. (1995). Selection of Additive for Stabilization and Recycling of Road Pavement. Pavement Rehabilitation Workshop. 24&25 August 1995. Queensland. 1-14.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Yadav, J.S., Tiwari, S.K., 2016a. Effect of inclusion of crumb rubber on the unconfinedcompressive strength and wet-dry durability of cement stabilized clayey soil. J. Build.Mater. Struct. 3, 68–84.

Yadav, J.S., Tiwari, S.K., 2016b. Behaviour of cement stabilized treated coir fibre-reinforcedclay-pond ash mixtures. J. Build. Eng. 8, 131–140.

Yadav, J.S., Tiwari, S.K., 2017. A study on the potential utilization of crumb rubber incement treated soft clay. J. Build. Eng. 9, 177–191.

Yaowarat, T., et al. (2018). "Compressive and Flexural Strength of Polyvinyl Alcohol–Modified Pavement Concrete Using Recycled Concrete Aggregates." Journal of Materials in Civil Engineering30(4): 04018046.

Yaowarat, T., et al. (2019). "Recycled Concrete Aggregate Modified with Polyvinyl Alcohol and Fly Ash for Concrete Pavement Applications." Journal of Materials in Civil Engineering31(7): 04019103.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Karn Kantatham, Suksun Horpibulsuk, Apichat Suddeepong, Apinun Buritatum, Menglim Hoy and Thaworn Takaikaew. **Effect of natural rubber latex on the compressive strength and durability of cement stabilized soil**, 6 PP.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Effect of natural rubber latex on the compressive strength and durability of cement stabilized soil

KarnKantatham[a,*], SuksunHorpibulsuk[b], ApichatSuddeepong[c], ApinunBuritatum[a], Menglim Hoy[a],Thaworn Takaikaew[a]

[a]*School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand*

[b]*School of Civil Engineering, Center of Excellence in Innovation for Sustainable Infrastructure Development, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand*

[c]*Center of Excellence in Innovation for Sustainable Infrastructure Development, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand*

*Corresponding Author's E-mail: karn.loey@gmail.com

Abstract

This research studied the effect ofnatural rubber latex onthe compressive strength and durability ofcementstabilized soil. Cement content used in this study was 3% by weight of soil. Water:rubber ratios were 100:0, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25 and 70:30 by weight. The influence of wetting and drying cycle on the durability of cementstabilized soil was investigated in this study. Test results show that using natural rubber latex properly can improve compressive strength and durability of cementstabilized soil. The outcome of the study therefore, identifies and indicates the level of efficiency and importance of using appropriate quantity of nature rubber latex in the cement stabilized soil, especially in the areas of wetting and drying durability.

Keyword: Cementstabilize soil; Natural rubber latex; Compressive strength; Durability

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1. Introduction

Soil is a natural material which can be found in all places. The engineering properties of soil depend on various factors, especially its original source and environment. Nowadays, a good quality soil for base/subbase applications is scarcely found due to the increasing of infrastructure constructions that consume a lot of soil volume. Therefore, it is necessary to use the available soil around the construction site. However, its basic engineering properties often do not meet the specification for pavement materials specified by the local authorities. Hence, the soil improvement technique is required. Soil improvement techniques basically used in the present consist of compaction, stabilization, reinforcement and consolidation.

Cement stabilization is one of the most common soil improvement concept, which reduces the plasticity index (PI) of soil and result in better soil compressive strength (Terrel et al., 1979)

Hogentogler (1938) reported that the improvement of the soil properties is a process that makes the natural soil more resistant to the deteriorationand more load capability. The mixture either in liquid or powder form is added to the soil and followed by the compaction method.

Cireo et al., (1962) explained that mixing Portland cement into the soil would change the properties and structure of the soil. However, the effect of improvement of soil properties might not be the same even though the soil has the same physical properties. Although the same cement content is use, the different chemical properties affected the soil compressive strength may not the same. The chemical composition in cement had a significant effect on the compressive strength of cement stabilized soil.

Mitchell and Jack (1966) described the structure of the soil stabilized by cement that the reaction of cement hydration changes the composition of the soil structure. The cement gel is infiltrated into the voids between the soil particle and releasing the lime. Lime reacts with SiO_2 and Al_2O_3 that are present in the soil. The hydration product from the cement reaction spreads along the soil skeleton. As a result, the strength of the soil cement stabilized increases as increasing in curing time.

Although the treatment of soil with cement is a normally option for road bases/subbases materials, it brittle behavior under compression. Furthermore, there are some discussions that using cement in a pavement base/subbase structure could be considered as the source of shrinkage cracking (Bahar et al., 2004).Therefore, the ductile behavior and toughness of pavement materials need to be improved to prevent the sudden failure due to traffic load.

The natural rubber latex has high flexibility properties which can mix well with water, thus allowing the soil compaction to be effective. Natural rubber latex is a lubricant liquid which allows the soil particles moves easily into the voids and make the soil denser. Another advantage of using natural rubber latex with cement is to increase the toughness behavior (Liu et al., 2011). Therefore, it is an interesting to apply the combined binder for improving the soil properties. However, the limited knowledge on this technique is still remain a barrier for using it in road construction.

The objective of this research is to study the strength and durability improvements of natural rubber latex and cement to improve the soil strength to meet the requirement of the Department of Highways, which unconfined compressive strength (UCS) of subbase soil cement-stabilized under the modified compaction of 1,750 kPa for 7 days curing (DOH, 1989).

2. Martials

Lateritic soil samples were collected from a borrow pit in Maung district, Nakhon Ratchasima province, Thailand. It was composed of 5.10% fine-grained particles

and 94.91% coarse-grained particles in which 67.61% is gravel and 27.30% is sand. The specific gravity of soil is 2.78 and the liquid and plastic limits are 21% and 7.5%, respectively. According to the Unified Soil Classification System (USCS), the lateritic soil was classified as well-graded gravel with silt and sand (GC-GW).The grain size distribution curve is shown in Fig. 1 and basic properties are summarized in Table 1. According to the local road authority specifications for subbase (DOH, 1989), this lateritic soil does not meet the requirement of the local standards. It is therefore required to mix with the high quality material to be considered as a pavement subbase or fill material.

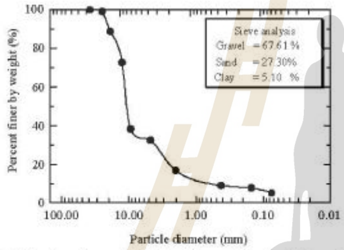


Fig.1 Grain size distribution of lateritic soil.

Table 1. Basic properties of lateritic soil.

Type of properties	value
Specific Gravity	2.78
Liquid limit	21 %
Plastic limit	7.5 %
Plasticity Index	13.5 %
Sieve analysis (USCS)	GW-GC
Gravel	67.61 %
Sand	27.30 %
Clay	5.10 %

Cement content (C) of 3% by weight of soil was used to stabilize the lateritic soil/natural rubber latex blends in this study as this content is commonly applied in field stabilization in Thailand.

The natural rubber latex was supported by Rubber Authority of Thailand (RAOT). Dry rubber content (DRC) of this rubber was 30%. The water to rubber ratios of 100:0, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25 and 70:30 by weight of water were used in this study.

The laboratory evaluation program on lateritic soil/natural rubber latex blends included modified Proctor compaction, unconfined compressive strength (UCS) and cyclic wetting and drying test were undertaken in this study.

Modified compaction effort was used to determine the maximum dry density (MDD) and optimum moisture content (OMC) of the lateritic soil/natural rubber latex blends. The modified compaction tests were conducted by following the ASTM 1557. The UCS samples were prepared at the OMC and MDD. The UCS samples had a diameter to height ratio of approximately 1.0 which is specified by the specification of Department of Highways and Department of Rural Roads, Thailand. The test was carried out in according with ASTM D 1633 (ASTM, 2000).

The method of cyclic wetting and drying test as per ASTM D 559-03 (ASTM, 2003) was carried out on cylindrical samples with 102 mm in diameter and 116.43 mm in height. The samples were wrapped in vinyl bags and stored in a humidity-controlled room of constanttemperature until 7 days of curing before wetting and drying test. The samples were submerged in deionized water at room temperature for 4 h. The samples were then dried in the oven at a temperature of 70°C for 12 h and air-dried at room temperature for at least 3 h. This process is referred to as 1 w–d cycle. The mass determination of the samples was carried out by weighing the samples at the end of each w-d cycle compared with the initial weight of samples before w-d tests. After attaining the target w–d cycles (0, 3, and 6 w-d cycles), the samples were immersed in deionized water for 2 h at the constant temperature of 25 ± 2°C prior to UCS test. UCS and weight loss were then measured. The UCS tests were

then undertaken with a rate of vertical displacement of 1 mm/min.

3. Results and Discussions

Figure 2 show the modified compaction test results of the 3% cement content stabilized soil/natural rubber latex blends at various water/rubber ratios compared to the sample without natural rubber latex. All compaction curves of cement stabilized soil/natural rubber latex blends exhibit bell-shaped compaction pattern, which is a typical shape of compacted traditional geo-materials. The MDD of specimen increases as natural rubber latex replacement content increases until 20% then subsequently decreases as increasing natural rubber latex replacement content beyond 20% while the OMC were similar despite the variations in the natural rubber latex contents.The higher MDD could be attributed to the increase in lubrication effect from natural rubber latex.

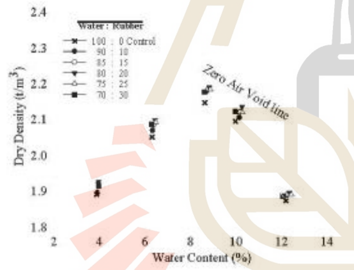


Fig. 2 Compaction curves of 3% cement stabilized soil/natural rubber latex blends.

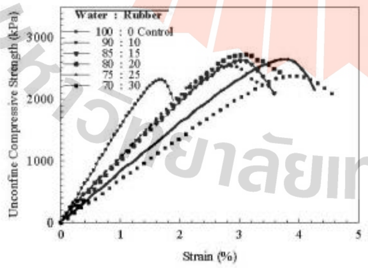


Fig.3 UCS Stress–strain behavior of 7 day soil/natural rubber latex blends.

Stress-strain relationship obtained from UC test for all specimens are summarized in Fig.3. For 7-days curing period, the mean UCS value obtained was between 2,315 and 2,722 kPa for the cement stabilized soil/natural rubber latex blends.The incremental replacement ratio of natural rubber latex into soil cement is the cause of an increase in the strain at failure point for all samples. In this study, the toughness is defined as the required energy to deform the sample to a strain level equivalent to the peak stress and is calculated from the area under the stress-strain curve up to the selected strain value. Therefore, the combined addition of cement and natural rubber latex shows a larger area which demonstrates a more ductile behavior of the sample when compared to the sample without natural rubber latex.

The average UCS for different mixture content at 7 days of curing compared with the minimum 7-day required strength for subbase materials (DOH, 1989) are presented in Fig. 4. The specimens were found to meet the minimum 7-day UCS of 1,750 kPa specified by DOH, Thailand. The increase in the natural rubber latex replacement content until 20% caused the increasing in UCS. However, the reduction of UCS was found when increasing natural rubber latex replacement content beyond 20%. The UCS improvement could be attributed to the increase in lubrication effect of soil particles with necessarily forming strong bonds between the rubber and soil particles. While the excessive increase in natural rubber latex (>20%) causes the rubber retarded the hydration reaction and therefore the UCS reduces (Yaowarat et al., 2018).

Fig. 5 shows the UCS of cement stabilized soil/natural rubber latex blends at

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

various number of w–d cycles. The accumulation of w–d cycles lead to the reduction of UCS. At particular rubber replacement content, UCS decreases as number of w-d cycles increases. However, the loss in UCS at a particular w-d cycle was found to decreases as the rubber replacement increases. The deterioration in strength as increasesissimilar to previous research (Levyet al., 1991). The weight loss of specimen versus number of w-d cycle are shown in Fig.6. The cement stabilized soil with 20% rubber replacement ratio has a minimum weight loss when compared to the other mixture.

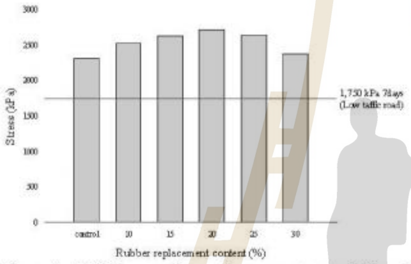


Fig. 4 UCS results of cement stabilized soil/natural rubber latex blends.

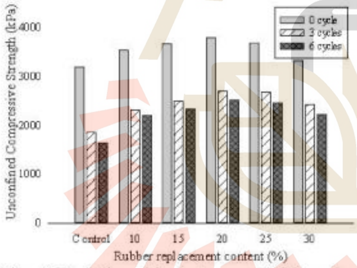


Fig. 5 Relationship between UCS and w-d cycles of cement stabilized soil/natural rubber latex blends.

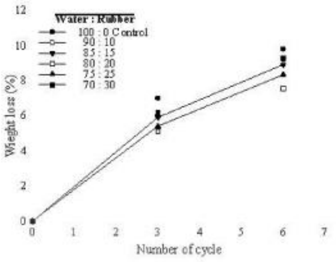


Fig. 6 Relationship between weight loss and cycle number of cement stabilized soil/natural rubber latex blends.

This indicates that the natural rubber latex entwines the soil particles and fills up some voids between soil particles which increase the attachment abilityand ductility to the specimens(Mirzababaeiet al., 2017).Therefore, the soil matrix is more difficult separation during the w-d cycles test as seen in Fig. 7 and causes the percentage of weight loss is lowest than the other mixtures.

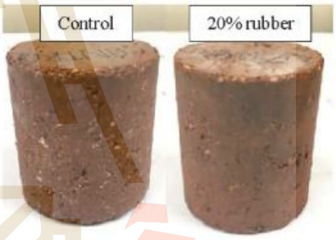


Fig. 7 Comparison of 0% and 20% rubber replacement ratio.

4. Conclusion

This research evaluates the effect of cement stabilized soil with natural rubber latex on density, UCS and durability against w-d cycles. The natural rubber latex is a polymer material, which can be used as a binder material to improve strength and durability. The following conclusions can be drawn from this research study.

1.The increase in maximum dry density causes the lubrication effect from

natural rubber latex makes the soil move easily to the void and therefor, the MDD increses as an increasing rubber content.

2.The UCS increases due to the density increased. The rubber in soil matrices makes the confinement to each soil particles, the addition of rubber in the specimen make more attachment ability and hence, more ductile behavior.

3. The addition of rubber increases attachment ability causes the soil difficult to separate from the matrices. With this reason, the weight loss during w-d cycles test is reduced and then the UCS for each w-d cycles slightly increase than sample without natural rubber.

5. Acknowledgments

Suranaree University of Technology

6. References

ASTM D1557-12e1, *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft^3 (2,700 kN-m/m^3))*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

ASTM D1633-17, *Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM D559-03, *Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures* (Withdrawn 2012), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.

C. A. Hogentogler, (A.M.ASCE), *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 1937, Vol. 63, Issue 6, Pg. 1035-1056

DOH. (1989). "*Standard for Soil Cement Subbase*" DH-S 206/1989, Department of Highways, Thailand (In Thai).

G.j. Levy, J.Levin, M. Gal, M.Ben-Hur and I. Shainberg (1992). *Polymers' Effects on Infiltration and Soil Erosion during Consecutive Simulated Sprinkler Irrigations*. Vol. 56 No. 3, Page 902-907

Liu, J., Bin Shi, Hongtao Jiang, He Huang, Gonghui Wang, ToshitakaKamai, (2011). *Research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer*.

Mirzababaei, M., Arulrajah, A., &Ouston, M. (2017). *Polymers for stabilization of soft clay soils*. Procedia engineering, 189, 25-32.

Mirzababaei, M., Arulrajah, ., Horpibulsuk, S., Soltani, A., & Khayat, N. (2018). *Stabilization of soft clay using short fibers and poly vinyl alcohol*. Geotextiles and Geomembranes, 46(5), 646-655.

R.Bahar, M.Benazzoug, S.Kenai.(2004).*Cement and Concrete Composites*Volume 26, Issue 7, Pages 811-82

Terrel, R.L. Epps, J.A. Barenberg, E.J. Mitchell, J.K. &Thomp-son, M.R. (1979). Soil stabilization in pavement structures: A user's manual. FHWA-IP-80-2, Vol. 2, *Department of Transportation*, Federal Highway Administration, USA

Yaowarat, T., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Mirzababaei, M., and Rashid, A. S. A. (2018). "*Compressive and Flexural Strength ofPolyvinyl Alcohol Modified Pavement Concrete Using Recycled Concrete Aggregates*." Journal of Materials in Civil Engineering., 30(4), 04018046.

Yaowarat, T., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Mohammadinia, A., and Chinkulkijniwat A. (2018). "*Recycled Concrete Aggregate Modified with Polyvinyl Alcohol and Fly Ash for Concrete Pavement Applications*." Journal of Materials in Civil Engineering., 31(7), 04019103.

ประวัติผู้เขียน

นายกานต์ กันทาธรรม เกิดเมื่อวันที่ 24 เดือนธันวาคม พ.ศ. 2538 ณ จังหวัดเพชรบูรณ์ สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเพชรพิทยาคม อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ ในปีการศึกษา 2556 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2560 และศึกษาต่อใน ระดับปริญญาโท ทางด้านวิศวกรรมปฐพี เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้และความสามารถให้กับ ตนเอง จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ.2561 ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนและวิจัยในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 2 รายวิชา คือ (1) ปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ (2) ปฏิบัติวัสดุการทาง ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยได้นำประสบการณ์ และความรู้ที่ได้จาก การเป็นผู้ช่วยสอนและวิจัยมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี จากการทำวิจัยนี้ทำให้ผู้วิจัยมี ความรู้และความเข้าใจทางด้านอิทธิพลของน้ำยางข้นต่อกำลังรับแรงอัดและความทนทานของดินซีเมนต์เป็นอย่างดี และมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 1 เรื่อง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี