รหัสโครงการ SUT7-712-59-12-35

รายงานการวิจัย

การประยุกต์ใช้ยางพาราและดินซีเมนต์สำหรับงานก่อสร้างถนน (Applications of Natural rubber and Soil-Cement for Highway construction)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-712-59-12-35

รายงานการวิจัย

การประยุกต์ใช้ยางพาราและดินซีเมนต์สำหรับงานก่อสร้างถนน (Applications of Natural rubber and Soil-Cement for Highway construction)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศาสน์ สุขประเสริฐ

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดนิรันดร์ เพชรัตน์

นางสาวรุ่งอรุณ บุญถ่าน

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2560

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นอย่างมากที่ให้การสนับสนุนงบประมาณวิจัย จากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2559 และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนรินทรวิโรฒ ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการในการทดสอบสมบัติของดินซีเมนต์สำหรับการวิจัยในครั้งนี้

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ร่วมวิจัย และผู้ช่วยวิจัยทุกท่านที่เป็นผู้ทดสอบสมบัติของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ วิเคราะห์ผลการทดสอบ และจัดทำรายงานจนเสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสาทวิชาความรู้ และครอบครัวที่อบอุ่น ซึ่งมีส่วนร่วมในการเป็นกำลังใจในการทำงานตลอดมา หากมีข้อผิดพลาดประการใด ต้องขออภัย ณ ที่นี้ด้วย และหากมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมประการใด สามารถแจ้งได้ที่ E-mail: sart@sut.ac.th

คณะผู้วิจัย

สิงหาคม 2560

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ด้วยน้ำยางพารา สำหรับงานก่อสร้างพื้นทาง เตรียมแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์จากวัสดุมวลรวมดินที่มีสมบัติไม่ตรงตามมาตรฐานรองพื้นทาง วัสดุมวลรวม ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา ร้อยละ 5 ร้อยละ 7.5 และร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และบ่มตัวอย่าง 7 วัน จากนั้นทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้าง และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ ดินซีเมนต์ที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ และมาตรฐานกรมทางหลวง

ผลการวิจัย พบว่า ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพาราร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีสมบัติทางวิศวกรรมกรรมตามมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ โดยมีกำลังรับแรงอัด เท่ากับ 19.58 กก./ตร.ซม. และโมดูลัสความยืดหยุ่น เท่ากับ 1,116.2 กก./ตร.ซม. เมื่อเปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ ซึ่งมีกำลังรับแรงอัด เท่ากับ 16.78 กก./ตร.ซม. และโมดูลัสความยืดหยุ่น เท่ากับ 1,025.9 กก./ตร.ซม. พบว่า ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารามีกำลังอัดเพิ่มขึ้น ร้อยละ 16.67 และโมดูลัสความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ร้อยละ 8.80 ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ ซึ่งมีกำลังรับแรงอัด เท่ากับ 21.25 กก./ตร.ซม. และโมดูลัสความยืดหยุ่น เท่ากับ 1,278.8 กก./ตร.ซม. พบว่า ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารามีกำลังรับแรงอัดลดลง ร้อยละ 7.89 และโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลง ร้อยละ 12.44 อย่างไรก็ตาม ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารามีค่ากำลังรับแรงอัด มากกว่า 17.50 กก./ตร.ซม. ตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ที่ ทล.-ม.204/2533 ดังนั้น ผลการวิจัยนี้ยืนยันว่าสามารถประยุกต์ใช้น้ำยางพาราเป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์สำหรับเป็นวัสดุพื้นทางในโครงสร้างถนน แต่ก็ยังมีสมบัติที่ด้อยกว่าดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Abstract

This research aimed to improve the quality of soil cement using natural latex rubber for highway construction. The samples were prepared using soil aggregates that were not meet for subbase standard of soil aggregate. Portland cement Type 1 was mixed with the aggregate at 5 wt.% of the soil. Then, the quality was improved using natural rubber latex at 5, 7.5 and 10 wt.% of water content respectively. The samples went through modified compaction and then cured for 7 days. After that it was put through the unconfined compression test. The results were compared with the improved soil cement conditioned with polymer additives, the unconditioned soil cement and against the Department of Highway standards.

Research results found that the soil cement improved using 5 wt% natural rubber latex had engineering properties that are in line with the required soil cement base standard with the unconfined compressive strength at 19.58 kg/cm^2 and the modulus of elasticity value of 1,116.2 kg/cm^2. When compared with the unconditioned soil cement with the unconfined compressive strength of 16.78 kg/cm^2 and the modulus of elasticity value of 1,025.9 kg/cm^2, it was found that the natural rubber latex conditioned soil cement showed an increase of 16.67 % in compressive strength and 8.80 % in the modulus of elasticity. Hence, when compared to the improved soil cement conditioned with polymer additives which has a unconfined compressive strength of 21.25 kg/cm^2 and the modulus of elasticity value of 1,278.8 kg/cm^2 it was found that the improved soil cement using natural latex rubber had lower compression strength by 7.89 % and lower modulus of elasticity of 12.44 %. However, the improved soil cement conditioned with natural latex rubber yielded a compression strength that was higher than the set standard at 17.50 kg/cm^2 under DH-S 204/2533. Therefore the results of this research guarantees that natural rubber latex can be applied for use as additives to improve the quality of soil cement for use as base material in highway construction. At the same time, the properties of improved soil cement using natural latex rubber is still lower that the quality of that using polymer additives.

สารบัญ

หน้าที่

กิตติกรรมประกาศ ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ ค
สารบัญ ง
สารบัญตาราง ช
สารบัญรูป ซ
บทที่ 1 1
1.1 ความสำคัญ ปัญหา และที่มาของการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรม 4
2.1 โครงสร้างทาง 4
2.1.1 วัสดุพื้นทาง (Base Material) 5
2.1.2 วัสดุรองพื้นทาง (Subbase Material) 6
2.1.3 วัสดุคัดเลือก (Selective Material) 6
2.2 ดินซีเมนต์ (Soil Cement) 6
2.3 ดินซีเมนต์ในงานโครงสร้างทาง 8
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของดินซีเมนต์ 9
2.4.1 ปริมาณของปูนซีเมนต์ 9
2.4.2 ชนิดของดิน 9
2.4.3 สารผสมเพิ่ม 10
2.4.4 ปริมาณความชื้นและการบดอัด 10
2.4.5 การบ่มดินซีเมนต์ 11
2.4.6 ระยะเวลาในการผสม 11
2.5 มาตรฐานดินซีเมนต์ในงานทาง 12

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หน้าที่

2.6 ปูนซีเมนต์ 13
2.6.1 การผลิตปูนซีเมนต์ 13
2.6.2 ประเภทของปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ 15
2.6.3 ปูนซีเมนต์ประเภทอื่น 17
2.7 ดินลูกรัง 20
2.8 น้ำยางพารา (Natural Rubber Latex) 22
2.9 การปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์ด้วยโพลิเมอร์ 24
2.10 ทบทวนงานวิจัย 25
บทที่ 3 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย 28
3.1 วัสดุในการวิจัย 30
3.1.1 วัสดุมวลรวมดิน (Soil Aggregate) 30
3.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนประเภทที่ 1 31
3.1.3 น้ำยางพารา 31
3.1.4 น้ำยาโพลิเมอร์ 32
3.2 การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของวัสดุมวลรวมดิน 34
3.2.1 การหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของดิน 34
3.2.2 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity of Soil) 34
3.2.3 การหาค่าการกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain Size Analysis) 35
3.2.4 การทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test) 35
3.2.5 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์ (California Bearing Ratio Test) 36
3.3 เงื่อนไขการทดลองปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ 38
3.4 การเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์ 39
3.4.1 เตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์ 39
3.4.2 การเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ 41
3.4.3 การเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา 41
3.5 การทดสอบแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์ 41
3.5.1 การทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ 42

หน้าที่

3.5.2 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้าง (Unconfined Compression Test) 42
บทที่ 4 ผลการวิจัย 44
4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมดิน 44
4.2 ผลการทดสอบดินซีเมนต์ 46
4.2.1 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินซีเมนต์ 47
4.2.2 ผลการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์ 49
4.2.3 ผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้างของดินซีเมนต์ 50
4.3 ผลการทดสอบดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ 53
4.3.1 ผลการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ 54
4.3.2 ผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้างของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ 56
4.4 ผลการทดสอบดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา 59
4.4.1 ผลการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา 60
4.4.2 ผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้างของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา 61
4.5 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และน้ำยางพารา 64
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย 68
5.1 สรุปผลทดสอบสมบัติของวัสดุมวลรวมดิน 68
5.2 สรุปผลทดสอบสมบัติของดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ 68
บรรณานุกรม 70
ประวัติผู้วิจัย 72

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 3.1 สมบัติทางกายภาพของน้ำยางข้นรักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย 32
ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกายภาพของน้ำยาโพลิเมอร์ ดิน-ซีเมนต์ (Polymer Soil Cement) 33
ตารางที่ 3.3 ค่า Standard Unit Load ที่ความลึกต่าง ๆ 36
ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขการทดลองปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์ 38
ตารางที่ 4.5 ส่วนผสมของแต่ละเงื่อนไขในการทดลองปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์ 39
ตารางที่ 4.1 ผลทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมดิน 48
ตารางที่ 4.2 ผลทดสอบขนาดความคละของวัสดุมวลรวมดิน 45
ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินซีเมนต์ 48
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์ กับดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ 65
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ กับดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ 67
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์ กับดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ 67

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูปภาพ

หน้าที่

รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบในชั้นโครงสร้างทางแบบยืดหยุ่ด (Flexible Pavement) และแบบแกร่งตัว (Rigid Pavement) 5

รูปที่ 2.2 โครงสร้างของดินซีเมนต์ 7

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการแตกร้าวของการใช้วัสดุผสมซีเมนต์เป็นพื้นทาง 8

รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของดินซีเมนต์กับเวลาในการผสม 12

รูปที่ 2.5 การแพร่กระจายของดินปนกรวดในประเทศไทย 21

รูปที่ 2.6 แบบจำลองอนุภาคยางธรรมชาติ 22

รูปที่ 2.7 ยางพารามีโครงสร้างทางเคมีแบบ ซิส-1, 4-พอลิไอโซพรีน 23

รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินการวิจัย 29

รูปที่ 3.2 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุมวลรวมดิน (Soil Aggregate) 30

รูปที่ 3.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราช้าง 31

รูปที่ 3.4 ลักษณะทางกายภาพของน้ำยางข้นรักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย 31

รูปที่ 3.5 ลักษณะทางกายภาพของน้ำยาโพลิเมอร์ ดิน-ซีเมนต์ (Polymer Soil Cement) 32

รูปที่ 3.6 การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ 37

รูปที่ 3.8 การเตรียมแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์ 40

รูปที่ 3.9 แท่งตัวอย่างดินซีเมนต์สำหรับทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้าง 42

รูปที่ 3.10 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้าง (Unconfined Compression Test) 43

รูปที่ 4.1 กราฟการกระจายขนาดของวัสดุมวลรวมดิน 46

รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 2.5 47

รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 47

รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 7.5 48

รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ ของวัสดุมวลรวมดิน ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ 49

รูปที่ 4.6 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุมวลรวมดินปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 50

รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์กับปริมาณปูนซีเมนต์ 51

หน้าที่

รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของของดินซีเมนต์กับปริมาณปูนซีเมนต์ 52
รูปที่ 4.9 ผลทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ 54
รูปที่ 4.10 กราฟความเค้น-ความเครียดของดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ 56
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์ 57
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นกับปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์ 58

รูปที่ 4.13 ผลทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา 60
รูปที่ 4.14 กราฟความเค้น-ความเครียดของดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา 61
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์กับปริมาณน้ำยางพารา 62
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์กับปริมาณน้ำยางพารา 63
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบผลทดสอบค่า ซี บี อาร์ ดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ 64
รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบความเค้น-ความเครียดของดินซีเมนต์ กับดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ 66
รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบค่ากำลังรังแรงอัด และโมดูลัสความยืดหยุ่น ของดินซีเมนต์กับดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ 66

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญ ปัญหา และที่มาของการวิจัย

การก่อสร้างถนนนั้นต้องใช้ดินลูกรังที่มีสมบัติทางวิศวกรรมตามมาตรฐานเป็นวัสดุรองพื้นทาง (Sub-base) และวัสดุพื้นทาง (Base) แต่ในปัจจุบันนี้หลายพื้นที่ประสบปัญหาดินลูกรังขาดแคลน หรือดินลูกรังมีสมบัติทางวิศวกรรมต่ำกว่ามาตรฐาน จึงต้องใช้ดินลูกรังจากแหล่งที่อยู่ห่างไกล ซึ่งมีต้นทุนการขนส่งสูงเมื่อเทียบกับค่าวัสดุ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จึงนำเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังด้วยปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมทำให้มีสมบัติที่ดี โดยเรียกวัสดุประเภทนี้ว่า “ดินซีเมนต์” (Soil Cement) ประเทศไทยเองกรมทางหลวง ก็ได้นำเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพวัสดุงานทางด้วยซีเมนต์มาใช้เป็นวัสดุรองพื้นทาง และวัสดุพื้นทาง ทดแทนดินลูกรังเป็นระยะเวลานานกว่า 30 ปี แล้ว แต่การปรับปรุงสมบัติของดินลูกรังด้วยปูนซีเมนต์ยังมีข้อเสียบางประการ เช่น ทำให้วัสดุมีความเปราะเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังก่อให้เกิดการแตกร้าวของชั้นพื้นทาง (Shrinkage Crack) สะท้อนถึงชั้นผิวทาง (Reflective Crack) จากปัญหาดังกล่าว จึงพิจารณาแนวทางการปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์ด้วยการเติมสารผสมเพิ่ม (Admixture) โดยใช้โพลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งเป็นวิธีที่ได้ผลที่ดี และใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างถนน

อย่างไรก็ตาม โพลิเมอร์สังเคราะห์มีราคาแพงทำให้ต้นทุนการก่อสร้างถนนเพิ่มขึ้น จากประเด็นปัญหาดังกล่าว จึงพิจารณาแนวทางเพื่อลดต้นทุนในการผลิตดินซีเมนต์ โดยประยุกต์ใช้น้ำยางพารา (Natural Rubber Latex) ซึ่งเป็นวัสดุโพลิเมอร์จากธรรมชาติที่มีราคาถูกกว่าโพลิเมอร์สังเคราะห์ มาเป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงสมบัติดินซีเมนต์ทดแทนโพลิเมอร์สังเคราะห์ราคาแพงดังกล่าว น้ำยางพาราเป็นสารโพลิเมอร์จากธรรมชาติ จึงมีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดี มีความทึบน้ำ เป็นสารหน่วงการใช้น้ำ และเป็นสารเชื่อมประสาน น่าจะช่วยลดข้อด้อยของดินซีเมนต์ในเรื่องป้องกันการซึมผ่านน้ำใต้ถนน เพิ่มความยืดหยุ่นของถนน เพิ่มความคงทนของถนน และความสามารถในการรับน้ำหนักของถนนได้ดี

ดังนั้น งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา เปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ และดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยใช้น้ำยาโพลิเมอร์สังเคราะห์ โดยผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติด้านวิศวกรรม ประกอบการวิเคราะห์ผลกระทบต่อสมบติของดินซีเมนต์จากการใช้น้ำยางพาราเป็นสารผสมเพิ่ม และเป็นข้อพิจารณาในการนำน้ำยางพารามาใช้ทดแทนการใช้น้ำยาโพลิเมอร์สังเคราะห์ ทั้งนี้ หากสามารถนำน้ำยางพารามาใช้ทดแทนโพลิเมอร์สังเคราะห์ในการปรับปรุงสมบัติของดินซีเมนต์ให้มีคุณภาพมาตรฐาน จะเป็นการขยายขอบเขตการใช้ประโยชน์จากน้ำยางพารา ซึ่งเป็นผลผลิตทาง

การเกษตรของประเทศไทยที่กำลังประสบปัญหาราคาตกต่ำอย่างรุนแรง ซึ่งจะช่วยเพิ่มอุปสงค์ของน้ำยางพาราและเป็นผลต่อเกษตรกรผู้ปลูกยางพาราอีกวิธีหนึ่งด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

การวิจัยในโครงการนี้เพื่อประยุกต์ใช้น้ำยางพาราซึ่งเป็นโพลิเมอร์จากธรรมชาติมาเป็นสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงสมบัติของดินซีเมนต์ทดแทนโพลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีราคาแพง โดยมีวัตถุประสงค์ในการทดสอบสมบัติของดินซีเมนต์ ดังนี้

1.2.1 เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กับน้ำยาโพลิเมอร์

1.2.2 เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กับน้ำยางพารา

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบหาค่ากำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กับน้ำยาโพลิเมอร์กับดินลูกรังที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ

1.2.4 เพื่อเปรียบเทียบหาค่ากำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กับน้ำยางพารากับดินลูกรังที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

แนวทางการปรับปรุงสมบัติของดินซีเมนต์โดยใช้น้ำยางพาราทดแทนโพลิเมอร์สังเคราะห์ โดยการทดสอบสมบัติของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา เปรียบเทียบกับสมบัติของดินซีเมนต์ที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ และดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ โดยมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

1.3.1 ดินลูกรัง ที่ใช้เป็นวัสดุในการผลิตดินซีเมนต์ เป็นดินลูกรังสมบัติทางวิศวกรรมต่ำจากแหล่งดินในเขตจังหวัดนครราชสีมา

1.3.2 น้ำยางพาราที่ใช้เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงสมบัติของดินซีเมนต์ เป็นน้ำยางพาราที่รักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย (High Ammonia Latex)

1.3.3 น้ำยาโพลิเมอร์ที่ใช้สำหรับปรับปรุงดินซีเมนต์ เป็นสารโพลิเมอร์ที่ใช้ปรับปรุงดินซีเมนต์ที่ผลิตขึ้นเพื่อการค้าและมีจำหน่ายในประเทศไทย

1.3.4 ดินซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

1.3.5 การทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และน้ำยางพารา เป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการวิจัยนี้ ทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางวิศวกรรมจากการใช้น้ำยางพาราร่วมกับดินผสมซีเมนต์ และก่อให้เกิดการศึกษาพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการพัฒนาในการนำน้ำยางพาราธรรมชาติมาใช้ให้หลากหลาย สอดคล้องกับนโยบายภาครัฐ โดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท องค์การบริหารส่วนตำบล สามารถนำผลการศึกษานี้ไปปรับใช้กับหน้างานก่อสร้างซึ่งมีปัญหาขาดแคลนวัสดุที่มีคุณภาพโดยใช้การปรับปรุงคุณภาพดินร่วมกับน้ำยางพาราได้ และอาจทดแทนการใช้น้ำยาโพลิเมอร์ที่มีราคาแพง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ทบทวนวรรณกรม

การก่อสร้างถนนมักใช้ดินซีเมนต์ (Soil-Cement) เป็นวัสดุรองพื้นทาง (Sub Base) ในกรณีที่ดินลูงรังในพื้นที่ก่อสร้างมีสมบัติไม่เหมาะสม การปรับปรุงสมบัติของดินซีเมนต์ด้วยการเติมสารผสมเพิ่ม (Admixture) โดยใช้โพลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นวิธีที่แพร่หลายในงานก่อสร้างถนน แต่เนื่องจากโพลิเมอร์สังเคราะห์มีราคาแพงทำให้ต้นทุนการก่อสร้างถนนเพิ่มขึ้น จากประเด็นปัญหาดังกล่าว จึงพิจารณาแนวทางเพื่อลดต้นทุนในการผลิตดินซีเมนต์ โดยประยุกต์ใช้น้ำยางพารา (Natural Rubber latex) ซึ่งเป็นวัสดุโพลิเมอร์จากธรรมชาติที่มีราคาถูกกว่าโพลิเมอร์สังเคราะห์ มาเป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงสมบัติดินซีเมนต์ทดแทนโพลิเมอร์สังเคราะห์ราคาแพงดังกล่าว

ทั้งนี้ เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ยางพาราและดินซีเมนต์สำหรับงานก่อสร้างถนน ผู้วิจัยได้ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับดินซีเมนต์ และการปรับปรุงสมบัติของดินซีเมนต์ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญที่สำคัญสำหรับการวิจัยนี้ โดยจะนำเสนอตามลำดับในข้อที่ 2.1-2.10 ดังนี้

1. โครงสร้างทาง
2. ดินซีเมนต์
3. ดินซีเมนต์ในงานโครงสร้างทาง
4. ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของดินซีเมนต์
5. มาตรฐานดินซีเมนต์ในงานทาง
6. ปูนซีเมนต์
7. ดินลูกรัง
8. น้ำยางพารา
9. การปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์ด้วยโพลิเมอร์
10. ทบทวนงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

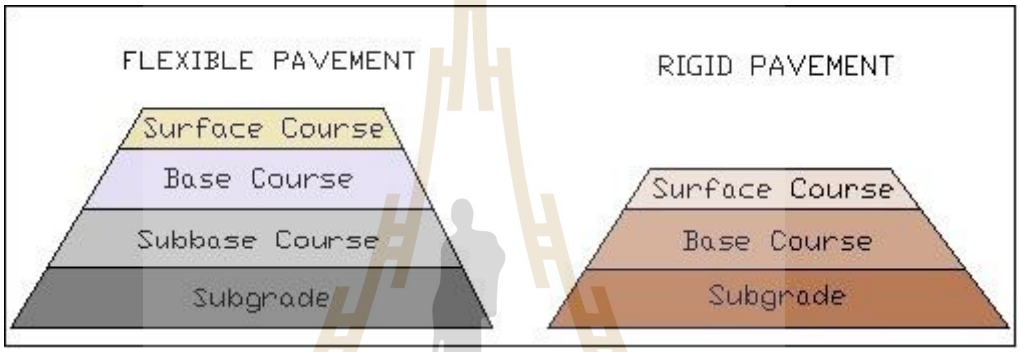
2.1 โครงสร้างทาง

โครงสร้างชั้นทางสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทหลัก คือ โครงสร้างชั้นทางแบบหยุ่นตัว (Flexible Pavement) โครงสร้างชั้นทางแบบแกร่งตัว (Rigid Pavement) และ โครงสร้างชั้นทางแบบผสม (Composite Pavement) (วารสารทางหลวง, 2555)

1. โครงสร้างชั้นทางแบบหยุ่นตัว (Flexible Pavement) ซึ่งมักเรียกทั่วไปว่าถนนลาดยาง ตามปกติโครงสร้างของชั้นทางแบบหยุ่นตัว ประกอบด้วย ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Surface Course) พื้นทาง (Base) รองพื้นทาง (Sub Base) ชั้นวัสดุคัดเลือก (ถ้ามี) วัสดุถมคันทาง และ/หรือ ดินเดิม (Subgrade) ดังรูปที่ 2.1 โครงสร้างชั้นทางแบบหยุ่นตัวถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นชั้นๆ

หน่วยแรงในแนวดิ่งที่เกิดจากน้ำหนักรถจะกระจายสู่ชั้นโครงสร้างทางตามความลึก ซึ่งจะมีความเข้มข้นสูงบริเวณที่ใกล้กับผิวจราจร และจะลดลงตามระดับความลึกที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นผู้ออกแบบจึงมักใช้วัสดุที่มีคุณภาพดีที่สุดไว้ใกล้กับผิวจราจร และวัสดุที่มีคุณภาพรองลงมาใช้ในชั้นลึกลงไป

2. โครงสร้างชั้นทางแบบแกร่งตัว (Rigid Pavement) หรือโครงสร้างถนนคอนกรีต โครงสร้างของชั้นทางแบบแกร่งตัวนี้ ประกอบด้วย ผิวทางคอนกรีต (Surface Course) พื้นทาง (Base) วัสดุถมคันทาง และ/หรือ ดินเดิม (Subgrade) ดังรูปที่ 2.1 ถนนคอนกรีตทั่วไปของกรมทางหลวงจะออกแบบตามวิธีของ Portland Cement Association หรือ PCA (1984) โดยกำหนดอายุการออกแบบไว้ที่ 20 ปี ทั้งนี้ถนนคอนกรีตอาจมีอายุยืนยาวถึง 40ปี ถ้ามีการบำรุงรักษาเป็นอย่างดี หรืออาจมีอายุการใช้งานสั้นกว่า 20 ปี ก็ได้ หากมีการแบกรับน้ำหนักบรรทุกเกินว่าที่ได้คาดการณ์ไว้



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบในชั้นโครงสร้างทางแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavement) และแบบแกร่งตัว (Rigid Pavement)

(ที่มา; http://www.gineersnow.com/details/what-is-the-difference-between-flexible-and-rigid-pavement)

3. โครงสร้างชั้นทางแบบผสม (Composite Pavement) หมายถึงโครงสร้างชั้นทางที่มีรูปแบบการผสมผสานกันระหว่างโครงสร้างชั้นทางแบบหยุ่นตัวกับโครงสร้างชั้นทางแบบแกร่งตัว โดยทั่วไปมักใช้เป็นรูปแบบโครงสร้างชั้นทางสำหรับงานบูรณะและปรับปรุงถนน (Pavement Rehabilitation) อาทิ การเสริมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตบนถนนคอนกรีต (Overlay) การใช้แผ่นคอนกรีตปิดทับถนนลาดยาง (Whitetopping) เป็นต้น เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานและเพิ่มความแข็งแรงทนทาน

2.1.1 วัสดุพื้นทาง (Base Material)

วัสดุสำหรับพื้นทางต้องมีคุณภาพดีเพราะจะต้องรับหน่วยแรงสูง พื้นทางมีหลายชนิดตามชนิดของวัสดุที่ใช้ ได้แก่ พื้นทางหินคลุก ประกอบด้วย หินโม่ขนาดใหญ่สุดตั้งแต่ 1½ นิ้ว ลดหลั่นลงมาถึงหินฝุ่นคละรวมกัน (Crushed Rock Soil Aggregate Type) เป็นวัสดุที่มีเนื้อแข็ง มีขนาดคละกันอย่างสม่ำเสมอ (Well Graded) โดยจะเกลี่ยแต่ง และบดอัดให้ถูกต้องตามข้อกำหนด พื้นทาง

กรวดโม่ ซึ่งประกอบด้วยวัสดุกรวดโม่มวลรวม (Crushed Gravel Soil Aggregate Type) เป็นวัสดุที่มีเนื้อแข็งมีขนาดคละกันอย่างสม่ำเสมอ (Well Graded) โดยจะเกลี่ยแต่และบดอัดให้ถูกต้องตามข้อกำหนด พื้นทาง Hot-rolled asphalt และพื้นทาง Soil Stabilization สำหรับประเทศไทยนิยมใช้หินย่อยหรือพื้นทางหินคลุก

2.1.2 วัสดุรองพื้นทาง (Subbase Material)

วัสดุที่นิยมใช้สำหรับรองพื้นทาง คือ วัสดุรองทางวัสดุมวลรวม ประกอบด้วยวัสดุมวลรวม (Soil Aggregate) ซึ่งต้องเป็นวัสดุที่มีเม็ดแข็ง ทนทาน มีส่วนหยาบผสมกับส่วนละเอียดที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเนื้อประสานที่ดี โดยจะเกลี่ยแต่งและบดอัดให้ถูกต้องตามข้อกำหนด ส่วนใหญ่เป็นดินลูกรังหรือใช้รองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase) ประกอบด้วย การใช้ดินผสมกับปูนซีเมนต์คลุกกัน โดยบดอัดตามข้อกำหนด กรณีที่แหล่งลูกรังอยู่ไกลจากหน้างานก่อสร้างก็ได้

2.1.3 วัสดุคัดเลือก (Selective Material)

ในกรณีที่คุณภาพของดินเดิมต่ำมาก (CBR ต่ำกว่า 2%) อาจจะหาวัสดุคัดเลือก จากแหล่งอื่นมาใส่เพิ่มอีกชั้นหนึ่ง เพื่อทำให้ดินเดิมมั่นคงขึ้น และแข็งแรงพอที่เครื่องจักรจะเข้าไปทำงานบดอัดวัสดุได้ วัสดุที่เหมาะสำหรับเป็นวัดสุคัดเลือกคือ หินผุ ซอยอกริเกท หรือทราย แบ่งออกเป็น

1. วัสดุคัดเลือก ก. (Selective Material A.) เป็นวัสดุมวลรวม (Soil Aggregate) ใช้ก่อสร้างบนชั้นวัสดุคัดเลือก ข. (Selective Material B.) โดยจะเกลี่ยแต่งและบดอัดตามข้อกำหนด

2. วัสดุคัดเลือก ข. (Selective Material B.) เป็นวัสดุมวลรวมใช้ก่อสร้างไปบนชั้นดินคันทาง (Subgrade)

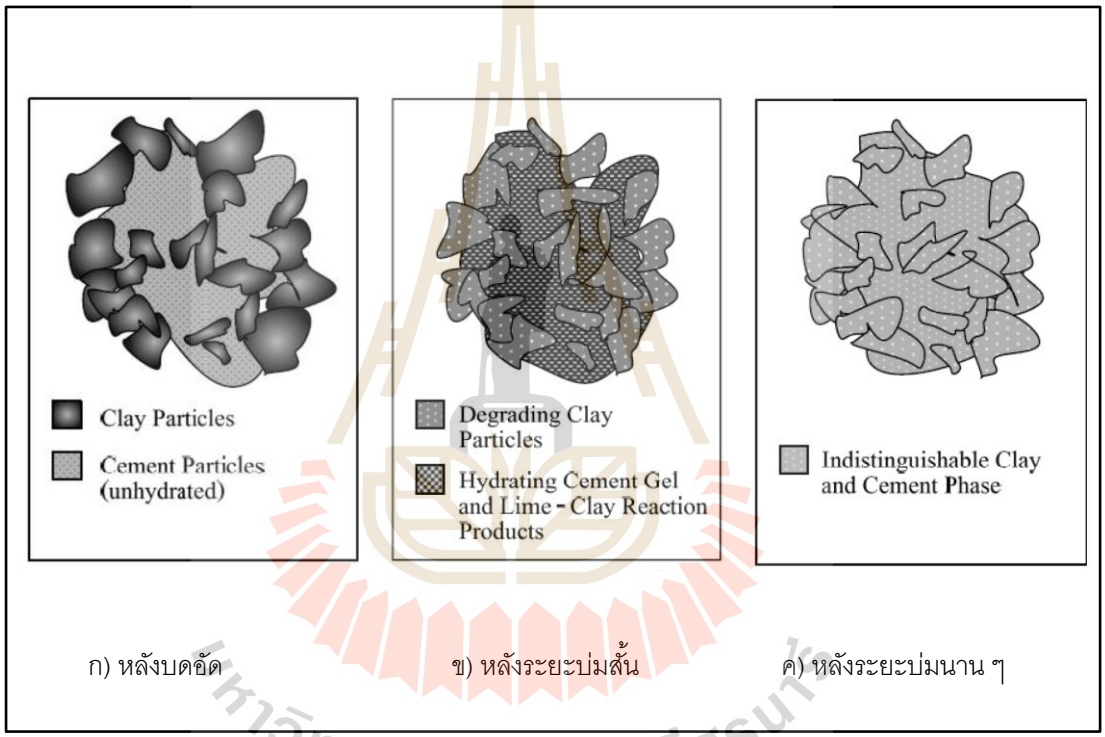
วัสดุคัดเลือกมักใช้ถมคันทางหรือปรับปรุงชั้นดินเดิม ใช้วัสดุที่ดีกว่าดินเดิมเช่นดินลูกรัง หินผุที่มีค่า CBR ในระดับ 6-10%

2.2 ดินซีเมนต์ (Soil Cement)

ดินซีเมนต์ (Soil Cement) เป็นดินที่ปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมหลักและน้ำในปริมาณที่เหมาะสม เมื่อบดอัดให้มีความหนาแน่นสูงสุดทำให้มีสมบัติทางวิศวกรรมที่ดี โดยปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ต้องมีปริมาณมากพอที่จะทำให้ดินซีเมนต์มีกำลังแบกทานตามที่กำหนด

กลไกลการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยการผสมปูนซีเมนต์และน้ำนี้ ไม่ได้เกิดจากอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมกับดินเพียงอย่างเดียว แต่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดชันด้วย โดยหลังจากที่ผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ทำให้เกิดสารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ในรูปของเจล ในส่วนผสมของปูนซีเมนต์และน้ำ (Czernin, 1962) การเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบและโครงสร้างของดินซีเมนต์ แบ่งเป็น 3 ระยะ (Mitchell and El Jack, 1966) ดังรูป

ที่ 2.2 ประกอบด้วย ระยะที่ 1 ภายใต้การบดอัด (รูปที่ 2.2 ก) ในช่วงแรกนี้ อนุภาคของดินได้ผสมเข้ากับซีเมนต์ แต่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ระยะที่ 2 ภายใต้การบ่มในระยะเวลาสั้น (รูปที่ 2.2 ข) เป็นช่วงที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั้น โดยอนุภาคของปูนซีเมนต์จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันทำให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และปล่อย Lime ออกมาทำปฏิกิริยากับ Silica และ Soil Alumina ที่มีอยู่ในดินทำให้เกิดการแยกตัวของสารทั้งสอง จากนั้นซีเมนต์เจลและสารประกอบที่เกิดขึ้นจะแทรกซึมไปตามอนุภาคของดิน ระยะที่ 3 ภายใต้การบ่มในระยะยาว (รูปที่ 2.2 ค) ในช่วงนี้เกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ โดยซีเมนต์เจลได้แทรกซึมกระจายไปทั่วก้อนดินซีเมนต์ ทั้งนี้ กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchel and El Jack, 1966)

ดินซีเมนต์สามารถใช้เป็นวัสดุการทาง (Highway Material) เช่น วัสดุรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase) วัสดุพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base) และสามารถใช้เป็นวัสดุก่อ (Masonry) โดยนำดินซีเมนต์มาอัดขึ้นรูป เรียกว่า อิฐดินซีเมนต์ (Soil Cement Block) หรือบล็อกประสาน (Interlocking Block) สามารถใช้เป็นอิฐรับน้ำหนัก นำมาสร้างผนังบ้านโดยไม่ต้องใช้เสาหรือคาน กำแพงรั้วบ้าน หรือบ่อเก็บได้โดยง่าย

2.3 ดินซีเมนต์ในงานโครงสร้างทาง

ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้พัฒนาเทคนิคการปรับปรุงวัสดุพื้นทางด้วยซีเมนต์ เมื่อปี พ.ศ. 2463 (วสันต์ ปั้นสังข์ และคณะ, 2553) โดยถนนที่ปรับปรุงวัสดุพื้นทางด้วยดินซีเมนต์นั้น สามารถรับน้ำหนักจราจรเพิ่มขึ้น ลดปัญหาการแตกร้าวแบบหนังจระเข้ ลดการแอ่นตัว และการกระเทาะล่อนหลุดของผิวแอสฟัลต์ และเพิ่มประสิทธิภาพของชั้นทางในสภาวะเปียกชื้นได้

สำหรับประเทศไทยในปัจจุบัน ดินลูกรังที่นำมาใช้เป็นวัสดุรองพื้นทาง (Sub-base) ที่มีคุณภาพตรงตามความต้องการของข้อกำหนดมาตรฐานงานทางค่อนข้างหายาก มีอยู่อย่างจำกัดและมีราคาสูงขึ้น ซึ่งทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัสดุรองพื้นทางจากแหล่งอื่นโดยใช่เหตุ เพื่อลดปัญหาดังกล่าวในปัจจุบันก็มีการนำปูนซีเมนต์มาช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุที่มีอยู่ใกล้บริเวณก่อสร้าง ในกรณีที่ไม่มีคุณสมบัติสอดคล้องตามข้อกำหนดของมาตรฐานงานทางเพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายการขนส่งดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และประเทศไทยเองกรมทางหลวง เริ่มนำเทคนิคการปรับปรุงวัสดุพื้นทางด้วยซีเมนต์มาใช้ในการก่อสร้างถนนครั้งแรก ในปี พ.ศ.2508 ในงานก่อสร้างทางสาย วารินชำราบ-เดชอุดม จังหวัดอุบลราชธานี มีระยะทาง 15 กิโลเมตร จากนั้น ได้นำดินซีเมนต์มาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างถนนอีกหลายเส้นทางในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ รวมระยะทางมากกว่า 1,400 กิโลเมตร (ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และสถิตย์พงศ์ อภิเมธีธำรง, 2543) อย่างไรก็ตามการก่อสร้างโดยดินซีเมนต์ในบางสายทางเกิดการแตกร้าวบนผิวทางเมื่อเปิดการจราจรได้ไม่นาน เนื่องจากการใช้ปูนซีเมนต์ก็ยังมีข้อเสียอยู่ เนื่องจากทำให้วัสดุมีความเปราะเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังก่อให้เกิดการแตกร้าวของชั้นพื้นทาง (Shrinkage crack) สะท้อนถึงชั้นผิวทาง (Reflective crack) ดังรูปที่ 2.3

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการแตกร้าวของการใช้วัสดุผสมซีเมนต์เป็นพื้นทาง
(วสันต์ ปั้นสังข์ และคณะ, 2553)

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของดินซีเมนต์

รายงานการวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงถึงปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมบัติด้านกำลังอัดของดินซีเมนต์ ได้แก่ ปริมาณซีเมนต์ ชนิดของดิน สารผสมเพิ่ม ปริมาณความชื้นและการบดอัด การบ่มดินซีเมนต์ และระยะเวลาในการผสม โดยสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์จะแปรผันตรงกับสัดส่วนของดินซีเมนต์ที่เป็นส่วนผสม ระยะเวลาในการบ่ม และอุณหภูมิในการบ่ม ดังรายละเอียดในข้อที่ 2.31-2.41-2.4.6 ตามลำดับ

2.4.1 ปริมาณของปูนซีเมนต์

กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ (Felt, 1955) แต่ทั้งนี้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมกับดินแต่ละประเภทนั้นเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ (Ruenkrairergsa, 1982) เนื่องจากอัตราการเพิ่มกำลังอัดของดินซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับชนิดของดินด้วย พันธะเชื่อมประสานในดินเม็ดหยาบจะแข็งแรงกว่าในดินเม็ดละเอียด ดังนั้น ดินที่มีดินเหนียวเป็นส่วนผสมมากจะให้กำลังอัดต่ำ นอกจากปริมาณของปูนซีเมนต์ที่มีผลต่อสมบัติการรับแรงอัดของดินซีเมนต์แล้ว ประเภทของปูนซีเมนต์ก็มีผลเช่นกัน ดังผลการศึกษาอิทธิพลของประเภทซีเมนต์ (Felt, 1955) ที่ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ โดยใช้ดินสองชนิด คือ Silty Clay Loam และ Sandy Lome ผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 ผลการทดสอบพบว่า ดินที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3 ทำให้ดินซีเมนต์มีกำลังอัดสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

2.4.2 ชนิดของดิน

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เป็นส่วนผสมในการปรับปรุงคุณภาพของดิน แต่ จากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถระบุได้ว่า ประเภทของดินก็มีผลต่อสมบัติของดินซีเมนต์เช่นกัน และมีส่วนอย่างมากในการกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพ ทั้งนี้อัตราการเพิ่มกำลังอัดของดินซีเมนต์ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน (Ruenkrairergsa, 1982) พันธะเชื่อมประสานในดินเม็ดหยาบแข็งแรงกว่าในดินเม็ดละเอียด ดินที่เหนียวมากจะให้กำลังอัดต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Reinhold ในปี 1955 ได้ทำการทดลองนำทรายมาผสมกับดินเหนียว โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณดินเหนียวที่ใช้ผสมตั้งแต่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ แล้วทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่น ที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดกับปริมาณดินเหนียว พบว่าปริมาณดินเหนียมเพิ่มขึ้นกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลง นอกจากนี้ จากรายงานผลการทดสอบดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ (Winterkorn and Chandrasekharn, 1951) ที่พบว่า สมบัติของดินซีเมนต์ขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ที่ผสมอยู่ในดิน และ Degree of Latterization ของดินลูกรัง

2.4.3 สารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่ม (Admixtures) หมายถึง สารเคมีอื่น ๆ นอกเหนือไปจาก ปูนซีเมนต์ วัสดุมวลรวม และน้ำที่ใช้เติมลงในส่วนผสมของคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติบางประการของคอนกรีต สารผสมเพิ่มจะให้ผลแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ที่ใช้ ขนาด รูปร่าง และส่วนขนาดคละของวัสดุมวลรวม น้ำ อุณหภูมิ และประเภทของสารผสมเพิ่ม

การใช้สารผสมเพิ่มเป็นส่วนผสมของดินซีเมนต์ย่อมมีผลต่อสมบัติของดินซีเมนต์ด้วยเช่นกัน ดังผลการศึกษาของ Clare and Pollard ในปี 1951 ที่ได้ทำการทดสอบดินทรายที่มีสารอินทรีย์ผสมอยู่ร้อยละ 0.3 พบว่าสารผสมเพิ่มจำพวกปูนขาว (Lime) มีส่วนช่วยให้ดินซีเมนต์แข็งตัวเร็วในระยะแรก ดินชนิดนี้เมื่อผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียวจะก่อตัวเมื่ออายุ 7 วัน แต่เมื่อเพิ่มปูนขาว ประมาณร้อยละ 2 จะช่วยให้ดินซีเมนต์ดังกล่าวแข็งตัวเร็วขึ้น 2 วัน มีรายงานผลการทดลอง (Fuller and Dabney, 1952) ที่ระบุว่าการใส่ปูนขาวกับดินซีเมนต์ที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูงจะทำให้การผสมและการบดอัดง่ายขึ้น งานทดลองใช้สารผสมเพิ่มในการปรับปรุงสมบัติของดินซีเมนต์ (Lambe and Moh, 1957) จากผลการทดลองใช้สารผสมจำนวน 29 ชนิด ซึ่งเป็นสารในกลุ่ม Dispersants, Synthetic Resins, Waterproofing Agents, Alkais และเกลือ เป็นส่วนผสมในดินซีเมนต์ โดยใช้ดินตะกอน ดินเหนียวปนดินตะกอน และดินฝุ่นแข็งพรุน ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้เป็นส่วนผสม ร้อยละ 5 โดยใช้สารผสมเพิ่มร้อยละ 0.5-1.0 พบว่า สารผสมเพิ่ม 4 ชนิด สามารถเพิ่มความแข็งแรงของดินซีเมนต์ถึงร้อยละ 100-150 ประกอบด้วย โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไฮรดรอกไซด์ โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต และโซเดียมซัลเฟต

2.4.4 ปริมาณความชื้นและการบดอัด

ปริมาณความชื้นมีผลต่อสมบัติของดินซีเมนต์ เนื่องจาก ปริมาณความชื้นในส่วนผสมของดินซีเมนต์จะช่วยให้ดินซีเมนต์มีความหนาแน่นสูงสุดแล้ว ยังทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันสมบูรณ์ด้วย นอกจากนี้ ปริมาณความชื้นยังมีผลต่อดินแตกต่างกันตามลักษณะของดินอีกด้วย โดยดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดินเหนียวหรือดินเม็ดละเอียดควรใช้ปริมาณความชื้นมากกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย ส่วนดินทรายหรือดินเม็ดหยาบควรใช้ความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย จะทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงและความคงทนสูง ดังรายงานผลการศึกษาอิทธิพลของความชื้นต่อกำลังอัด (Felt, 1955 and Davidson et al.,1962) พบว่า ปริมาณความชื้นและความหนาแน่นมีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ สำหรับดินทรายควรทำการบดอัดด้วยปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ส่วนดินเหนียวควรบดอัดด้วยปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเล็กน้อยจึงจะให้กำลังอัดสูงสุด ทั้งนี้ การอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่นของดิน (Ruenkrairergsa, 1982) ที่บดอัดตามวิธีของพร็อกเตอร์ (Proctor) มาใช้กับดินซีเมนต์นั้น พบว่า ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมนอกจากจะทำให้ความหนาแน่นสูงสุดแล้ว ยังทำให้ซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์ด้วย สำหรับดินซีเมนต์ความหนาแน่นสูงสุดไม่จำเป็นว่าจะทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงและมีความ

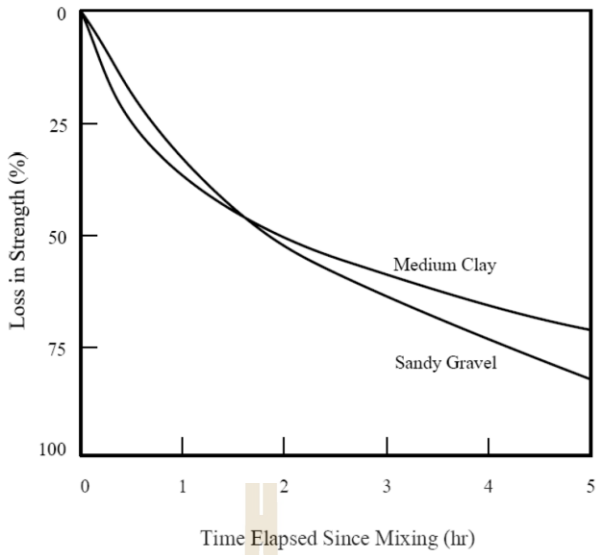
คงทนมากที่สุดเสมอไป จากผลการทดลองหาค่าความคงทนด้วยวิธี Freeze-Thaw ของดินตะกอนและดินเหนียวผสมซีเมนต์ พบว่า ความคงทนจะมีค่าสูงสุดเมื่อทำการบดอัดที่มีปริมาณความชื้นสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย หากทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม จะทำให้ค่าความคงทนลดลง สำหรับการทดลองในดินทรายผสมซีเมนต์ พบว่า ความแข็งแรงของดินซีเมนต์มีค่าสูงสุดเมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย

2.4.5 การบ่มดินซีเมนต์

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการบ่มดินซีเมนต์ทั้ง อุณหภูมิ และอายุการบ่ม มีผลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ดังรายงานผลการศึกษาของ Clare and pollard ในปี ค.ศ.1951 ที่ได้รายงานถึงผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อายุการบ่ม 7 วัน ซึ่งพบว่า มีค่ากำลังอัดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการบ่มดินซีเมนต์ที่อุณหภูมิห้อง คือ 25 องศาเซลเซียส โดยค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นคิดเป็น ร้อยละ 2-2.5 ต่ออุณหภูมิการบ่มที่เพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาของ Leadabrand ในปี ค.ศ. 1956 ที่ทดลองหากำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มตั้งแต่ 2 วัน จนถึง 5 ปี พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์คล้ายกับกำลังอัดของคอนกรีต คือ กำลังอัดแปรผันตรงกับอายุการบ่ม

2.4.6 ระยะเวลาในการผสม

การเพิ่มระยะเวลาในการผสมดินซีเมนต์มีผลทำให้ดินซีเมนต์มีค่ากำลังอัดลดลง ดังผลการศึกษาของ Marshall ในปี ค.ศ.1954 ที่ได้ศึกษาผลการหน่วงเวลาการผสมระหว่างการผสมชื้นและการบดอัด พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการผสมเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาของ Felt ในปี ค.ศ.1955 ที่ได้ศึกษาอิทธิพลของการหน่วงเวลาต่อกำลังอัดและความคงทน โดยผสมให้นานขึ้น แล้วทิ้งไว้ก่อนบดอัด พบว่า ผลการทดสอบกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดิน 3 ชนิด คือ ดินกลุ่ม A-2 (LL=26, PI=11) ดินกลุ่ม A-4 (LL=3.5, PI=12) และดินกลุ่ม A-6-7 (LL=47, PI=26) มีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อเวลาการผสมนานขึ้น การหน่วงเวลาการผสมแบบหยุดเป็นครั้งคราว มีผลเสียน้อยกว่าแบบหยุดผสมเลย จากรายงานผลการศึกษาของ Ingles and Metcalf ในปี ค.ศ.1972 ซึ่งได้ทดสอลดิน 2 ชนิด คือ Medium Clay และ Sandy Gravel เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่ใช้ในการผสมดินซีเมนต์ พบว่า หากเพิ่มเวลาในการผสมดินซีเมนต์ 1-2 ชั่วโมง กำลังอัดลดลงมากกว่าร้อยละ 50 ถ้าเวลาการผสมดินซีเมนต์มากกว่า 2 ชั่วโมง กำลังอัดของ ดินซีเมนต์ที่ผลิตจาก Sandy Gravel จะน้อยกกว่าดินซีเมนต์ที่ผลิตจาก Medium Clay ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของดินซีเมนต์กับเวลาในการผสม
(Ingles and Metcalf, 1972)

2.5 มาตรฐานดินซีเมนต์ในงานทาง

กรมทางหลวงได้กำหนดมาตรฐานของดินซีเมนต์สำหรับใช้เป็นวัสดุโครงสร้างทาง คือ มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base) มาตรฐานที่ ทล.-ม.204/2533 และมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase) มาตรฐานเลขที่ ทล.-ม.206/2531 ซึ่งในส่วนหนึ่งได้แสดงข้อกำหนดในการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ มีรายละเอียดดังนี้

1. อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์และน้ำที่ใช้ผสมดินนั้น นายช่างผู้ควบคุมจะเป็นผู้กำหนดให้ที่หน้างาน และอาจจะสั่งเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับการทดลองหากำลังรับแรงอัดของแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์ ทั้งในห้องทดลองและจากการทำรองพื้นทางทดลองในสนาม

2. ในการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์เพื่อหาปริมาณซีเมนต์ที่ผสมกับดินและน้ำให้ถือเอาค่า Unconfined Compressive Strength ของแท่งตัวอย่างดินที่ได้จากการทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.105/2515 “วิธีการทดลองค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน” โดยอนุโลม ซึ่งแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์ทดสอบจะถูกบดอัดตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” ภายหลังจากบ่มในถุงพลาสติกเพื่อมิให้ความชื้นเปลี่ยนแปลงนาน 7 วัน แล้วนำไปแช่น้ำนาน 2 ชั่วโมง จะต้องมีค่าเท่ากับ 17.5 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร (ksc) หรือ 250 ปอนด์แรงต่อตารางนิ้ว (psi) หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบ สำหรับพื้นทางดินซีเมนต์ และจะต้องมีค่าเท่ากับ 689 กิโลปาสคาล (kPa) หรือ 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบ สำหรับรองพื้นทางดินซีเมนต์

3. ปริมาณน้ำในดินที่ใช้ในการเตรียมแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์ เพื่อการทดสอบหากำลังรับแรงอัด ให้ใช้ปริมาณน้ำในดินที่ Optimum Moisture Content ซึ่งได้จากการทดลองบดอัดดินตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” ปริมาณน้ำในดินนี้ใช้เป็นแนวทางในการควบคุมกับบดทับในสนามขณะทำการก่อสร้างรองพื้นทางดินซีเมนต์

<u>หมายเหตุ</u> หากต้องการหาปริมาณน้ำในดินที่ Optimum Moisture Content ที่แท้จริงของส่วนผสมดินซีเมนต์แล้ว ให้หาจากการทดลองบดอัดดินซีเมนต์ที่อัตราส่วนของปูนซีเมนต์จากส่วนผสมที่ให้กำลังรับแรงอัด 17.5 ksc (1716.16 kPa) หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบ สำหรับพื้นทางดินซีเมนต์ และ 689 kPa หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบ สำหรับรองพื้นทางดินซีเมนต์ แล้วดำเนินการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” อย่างไรก็ดี ปริมาณน้ำในดินที่ Optimum Moisture Content ซึ่งได้จากการบดอัดดินซีเมนต์ จะให้ค่าที่ไม่แตกต่างไปจากปริมาณน้ำในดินที่ Optimum Moisture Content ซึ่งได้จากการบดอัดดินโดยวิธีการทดลองแบบเดียวกันมากนัก

<u>ข้อพิจารณา</u>

- สำหรับมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ มาตรฐานที่ ทล.-ม.204/2533 กำหนดให้ออกแบบส่วนผสมที่ให้กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน ให้มีค่าเท่ากับ 17.5 ksc (1716.16 kPa) หรือ 250 psi
- สำหรับมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ มาตรฐานเลขที่ ทล.-ม.206/2531 กำหนดให้ออกแบบส่วนผสมที่ให้กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน ให้มีค่าเท่ากับ 689 kPa (7.01 ksc) หรือ 100 psi

2.6 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีต ที่ใช้มากที่สุดในปัจจุบันคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับงานที่นำไปใช้ นอกจากนี้ยังมีปูนซีเมนต์อื่นที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เหมาะกับงานที่หลากหลาย โดยเฉพาะด้านความแข็งแรงความทนทาน ความสวยงาม และการใช้งานเฉพาะด้าน คุณสมบัติของปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่เป็นวัตถุดิบและกรรมวิธีการผลิต สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันในขั้นตอนการเผาเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ การปรับส่วนประกอบของวัตถุดิบจะทำให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป

2.6.1 การผลิตปูนซีเมนต์

การผลิตปูนซีเมนต์ในปัจจุบันแตกต่างจากเดิมบ้างแต่ยังคงใช้วัตดุหลักที่ใช้ในสมัยแรก และให้ความสำคัญที่คุณภาพของปูนซีเมนต์ที่ผลิต และประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต การผลิต

ปูนซีเมนต์มีความแพร่หลายและได้รับความนิยมสูงเพราะวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีปริมาณมากและหาได้ง่ายในที่ต่าง ๆ ทั่วโลก

1. วัตถุดิบ

วัตถุดิบ ที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ

- วัสดุธาตุปูน เป็นออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ได้แก่ หินปูน และหินชอล์ก
- วัสดุอาจิลลาเชียส เป็นออกไซด์ของธาตุซิลิกอน และอลูมิเนียม ได้แก่ ดินเหนียว หินเชล หรือหินดินดาน และหินชนวน ในบางครั้ง ดินที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีทั้งออกไซด์ของแคลเซียมและซิลิกอน ได้แก่ ดินมาร์ล นอกจากนี้ การผลิตปูนซีเมนต์ยังต้องการวัตถุดิบอย่างอื่น ได้แก่ ออกไซด์ของเหล็ก ซึ่งได้จากดินลูกรัง ออกไซด์ของอลูมิเนียมและเหล็กช่วยให้ปฏิกิริยาในเตาเผาเกิดได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังต้องการยิปซัม เพื่อหน่วงปฏิกิริยาไม่ให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวเร็วเกินไปโดยบดรวมกับปูนเม็ดในขั้นตอนสุดท้าย

2. กรรมวิธีในการผลิต

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ กระบวนการผลิตแบบเปียกและกระบวนการผลิตแบบแห้ง การเลือกกระบวนการผลิตแบบใดขึ้นอยู่กับความชื้นของวัตถุดิบในสภาพธรรมชาติ ความแข็งแรงของวัตถุดิบ และชนิดของวัตถุดิบ ที่ความชื้นช่วงหนึ่งการบดวัตถุดิบให้ละเอียดจะทำได้ยาก จำเป็นต้องขจัดความชื้นที่มีอยู่หรือเพิ่มน้ำให้มีปริมาณมากขึ้น ถ้าวัตถุดิบเป็นดินเหนียวจะมีความชื้นสูง ดังนั้นจึงใช้กระบวนการผลิตแบบเปียก หากวัตถุดิบเป็นหินและหินเชลจะมีความชื้นค่อนข้างต่ำจึงควรใช้กระบวนการผลิตแบบแห้ง

ในกระบวนการผลิตแบบเปียก วัตถุดิบจะผสมกับน้ำตามสัดส่วนที่กำหนด โดยปกติถ้าใช้ดินเหนียวและหินชอล์กจะใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อน้ำประมาณ 1:3 จากนั้นจะบดสัดส่วนผสมให้ละเอียดในหม้อบดละเอียดเปียก น้ำโคลนข้นที่ได้จะนำไปผ่านตะแกรงละเอียดแล้วส่งเข้าเตาเผา วัตถุดิบที่ป้อนเข้าเตาเผาจะมีความชื้นประมาณร้อย 35 ถึง 50

ในกระบวนการผลิตแบบแห้ง วัตถุดิบที่ระเบิดมาจากเหมืองแร่จะนำมาย่อยให้เล็กลงในเครื่องย่อยขั้นต้น และเครื่องย่อยขั้นที่สองตามลำดับ จากนั้นจึงนำวัสดุไปบดละเอียดในหม้อบดวัตถุดิบ แล้วผสมกันตามสัดส่วนที่ต้องการในไซโลผสมวัตถุดิบ จากนั้นเพิ่มความร้อนของวัตถุดิบด้วยลมร้อนก่อนส่งเข้าเตาเผา ในกรณีของกระบวนการผลิตแบบกึ่งแห้ง จะนำวัตถุดิบไปทำเป็นเม็ดโดยการเติมน้ำเล็กน้อยและผ่านเข้าไปในเครื่องทำเม็ด วัตถุดิบจะจับกันเป็นก้อนกลมขนาดประมาณ 12 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อทำให้การป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เตาเผาสะดวกขึ้น วัตถุดิบจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 12 ดังนั้นเตาเผาของกระบวนการผลิตแบบแห้งและกึ่งแห้งจึงมีขนาดเล็กกว่าเตาเผาในกรณีกระบวนการผลิตแบบเปียก

เตาเผาโรงงานปูนซีเมนต์เป็นเตาแบบหมุน ทำด้วยเหล็กกล้ารูปทรงกระบอกข้างในบุด้วยอิฐทนไฟ เตาเผาแบบหมุนมีความเอียงจากแนวราบเล็กน้อยประมาณ 3 ถึง 5 ในร้อย และหมุนรอบแกน

ของทรงกระบอกอย่างช้า ๆ ประมาณ 1 ถึง 3 รอบต่อนาที เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาเป็นถ่านหิน น้ำมัน หรือก๊าซธรรมชาติ วัตถุดิบจะป้อนเข้าทางส่วนบนของเตาสำหรับกระบวนการผลิตแบบเปียกวัตถุดิบอยู่ในเตาเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ถึง 2 ชั่วโมง 30 นาที และเป็นเวลา 30 นาที ถึง 1 ชั่วโมง สำหรับกรณีผลิตแบบแห้ง

กระบวนการที่เกิดขึ้นในเตาเผาสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ

1. การขจัดน้ำอิสระโดยการระเหย (Evaporation)
2. การขจัดน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ (Calcination)
3. การทำปฏิกิริยาเป็นปูนเม็ด (Clinkering)
4. การลดอุณหภูมิ (Cooling)

ในขั้นแรกวัตถุดิบที่ป้อนเข้าทางส่วนบนของเตาเผาจะได้รับความร้อนจากอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิ 250 ถึง 450 องศาเซลเซียสและขจัดน้ำอิสระออกไป อุณหภูมิวัตถุดิบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึง 600 องศาเซลเซียสที่จุดนี้มีวัตถุดิบเริ่มสลายตัวโมเลกุลน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์จะค่อยๆถูกขจัดออกไป เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาเบื้องต้น เกิดสารประกอบของแคลเซียมอลูมิเนตและเฟอร์ไรต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวช่วยให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิประมาณ 1,350 องศาเซลเซียส เกิดการหลอมละลายของแคลเซียมอลูมิเนตและเฟอร์ไรและเริ่มทำปฏิกิริยาเป็นปูนเม็ด วัตถุดิบจะหลอมละลายและประมาณร้อยละ 20 ถึง 30 จะกลายเป็นของเหลว เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส ส่วนผสมจะทำปฏิกิริยาเป็นปูนเม็ดก้อนกลมขนาด 3 ถึง 40 มิลลิเมตร ในส่วนท้ายสุดของเตาอุณหภูมิจะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วและปูนเม็ดจะไหลออกจากเตาเผา

ปูนเม็ดออกจากส่วนล่างของเตาเผาจะยังคงร้อนมาก และจะลดอุณหภูมิปูนเม็ด อัตราการลดลงของอุณหภูมิมีผลต่อความเป็นผลึกของปูนเม็ด ต่อจากนั้นนำปูนเม็ดมาบดร่วมกับยิปซัม ในหม้อบดปูนซีเมนต์ ปริมาณยิปซัมที่ใช้ประมาณร้อยละ 2.5ถึง 3 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เพื่อหน่วงการก่อตัวอย่างรวดเร็วของปูนซีเมนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.6.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การศึกษาอิทธิพลของสารประกอบทำให้สามารถปรับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานประเภทต่างๆมาตรฐานการทดสอบวัสดุตาม ATSM C 150 ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

1) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ประเภทใช้กันมากในงานคอนกรีต ประมาณได้ว่าร้อยละ 90 ของปูนซีเมนต์ที่ผลิตในสหรัฐอเมริกาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษ กว่าธรรมดา และใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไป เช่น เสา คาน ฐานรากของอาคาร ถนน เป็นต้น ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังสูงสุดในระยะเวลาไม่รวดเร็วมากนักและให้ความร้อน ปาน

กลาง ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราช้าง ตราพญานาคสีเขียว ตราทีพีไอสีแดง ตราภูเขาตราดาวเทียม และตราเอกซีเมนต์สีน้ำเงิน เป็นต้น

2) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ดัดแปลง เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนไม่สูงมากนักความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ(ประเภทที่ 4) และให้กำลังใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่เกิดความร้อนและ ทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตได้ปานกลาง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ใช้ค่อนข้างน้อยในประเทศไทยที่มีอยู่ได้แก่ปูนซีเมนต์ ตราพญานาค 7 เศียร

3) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็วเป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรก ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงเพราะมีปริมาณ สูงและความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาก เหมาะสำหรับงานที่ต้องการใช้งานเร็ว เช่น งานซ่อมแซมหรืองานที่ต้องการถอดแบบเร็ว เช่น เสาเข็มคอนกรีต เสาไฟฟ้าคอนกรีต ผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูป ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ ได้แก่ ตราเอราวัณ ตราพญานาคสีแดง ตราทีพีไอสีดำ และตราเอกซีเมนต์สีแดง เป็นต้น

4) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต่ำมากเพราะปริมาณของ C_3S ต่ำ คือ โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณร้อยละ 25 ที่ 30 แต่จะมี C_2S ที่ค่อนข้างสูง คือโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 50 ถึง 60 ปูนซีเมนต์ชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับใช้งานในการก่อสร้างคอนกรีตหลา (Mass Concrete) หรือโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เช่น เขื่อนคอนกรีตตอม่อขนาดใหญ่เนื่องจากมีคุณสมบัติในการให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำ ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ไม่มีจำหน่ายในท้องตลาดในประเทศไทยต้องสั่งโดยตรงจากผู้ผลิต

5) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต เป็นปูนซีเมนต์ที่ต้านทานซัลเฟตได้สูงปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะมีปริมาณ ของ C_3A ต่ำมากโดยทั่วไปไม่เกินร้อยละ 5 เพราะ C_3A จะทำให้เกิดการรวมตัวกับซัลเฟตได้ง่าย ดังนั้นเมื่อ C_3A มีปริมาณน้อยจึงมีการการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยหรือไม่ได้เลย ทำให้การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตลดลง ปูนซีเมนต์ชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่สร้างอยู่ในที่มีเกลือหรือสาร ละลายซัลเฟตปูนซีเมนต์ชนิดนี้ได้แก่ ตราช้างสีฟ้า ตราปลาฉลาม และตราทีพีไอสีฟ้า เป็นต้น

2.6.3 ปูนซีเมนต์ประเภทอื่น

นอกจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 5 ประเภทที่ประกอบด้วย สารในปริมาณที่ต่างกันยังมีปูนซีเมนต์อื่น ที่ทำมาจากการผสมสารบดกับปูนเม็ดโดยการเพิ่มสารประกอบอื่นระหว่างการเผาซึ่งได้แก่

1) ปูนซีเมนต์ผสมหรือปูนซีเมนต์ซิลิกา ได้จากการบดปูนเม็ดกับวัสดุเฉื่อย จำพวกทรายซึ่งประกอบด้วยซิลิกาหรือบดร่วมกับหินปูนที่เฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา ปริมาณวัสดุเฉื่อยที่ใช้ประมาณร้อยละ 20 ถึง 30 โดยน้ำหนักทำให้ปูนซีเมนต์มีราคาถูกลง ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น การเยิ้มน้ำต่ำและการหดตัวเมื่อตากแห้งน้อยลงจึงช่วยลดการแตกร้าวที่ผิวเหมาะสำหรับใช้ ในงานปูนก่อหรือปูนฉาบเพราะจะได้มีเวลาในการทำงานนานขึ้นแต่ข้อควรระวัง สำหรับปูนซีเมนต์ประเภทนี้คือมีกำลังต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอายุต้น ๆ จึงไม่ควรใช้ในการก่อสร้างองค์อาคารหลัก เช่นพวกเสา คาน พื้น หรือฐานราก ของอาคาร ปูนน้อยกว่าปกติปูนซีเมนต์ประเภทนี้ผลิตจำหน่ายในประเทศไทยได้แก่ ตราเสือ ตรางูเห่า ตราทีพีไอสีเขียว ตราดอกบัว ตราจรวด และตราเอกซีเมนต์ที่เขียว เป็นต้น

2) ปูนซีเมนต์ขาว สีเทาในปูนซีเมนต์เกิดจากสารออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส ดังนั้นการผลิตปูนซีเมนต์ขาวจึงทำได้โดยการลดปริมาณสารดังกล่าวให้ต่ำลง ซึ่งอาจใช้ดินขาวจีนกับดินสอพองหรือหินปูน ที่ไม่มีออกไซด์ของธาตุเหล็กเป็นวัตถุดิบในการผลิต โดยทั่วไปแล้วจะกำหนดให้ออกไซด์ของเหล็กในปูนซีเมนต์ขาวต่ำกว่าร้อยละ 0.5 ซึ่งทำให้มีปริมาณของสารเฟอร์ไรด์ในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 0.5 เท่านั้น ดังนั้นปูนซีเมนต์ขาวจึงมีส่วนประกอบของ C_3A สูงและแทบจะไม่มี C_4AF นอกจากนี้ในการเผาจะใช้น้ำมันเพราะถ่านหินจะมีออกไซด์ของธาตุเหล็กและแมงกานีสปนอยู่สูง การใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงจึงทำให้ต้นทุนการผลิตปูนซีเมนต์ขาวมีราคาที่สูง กว่าปูนซีเมนต์ธรรมดากำลังอัดของปูนซีเมนต์ชนิดนี้ส่วนมากจะไม่สูงนัก จึงไม่เหมาะที่จะนำไปทำโครงสร้างที่รับแรง ปูนซีเมนต์ชนิดนี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความสวยงามทางด้านสถาปัตยกรรม เพราะสามารถใช้สีผสมให้เป็นสีที่ต้องการได้ เช่น ใช้ทำหินขัด หินล้าง เป็นต้น ปูนซีเมนต์ขาวที่ผลิตในประเทศไทยได้แก่ ปูนซีเมนต์ขาวตราช้างเผือก และปูนซีเมนต์ขาวตราเสือ

3) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน เป็นปูนซีเมนต์ที่ได้จากการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับวัสดุปอซโซลาน วัสดุปอซโซลาน คือ วัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกา และอลูมินาที่ละเอียด โดยตัวของมันเองจะไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และน้ำที่อุณหภูมิปกติจะได้สารที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน วัสดุปอซโซลาน ได้แก่ ดินเหนียวเผา เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย ซิกาฟูม และเถ้าแกลบบดละเอียด เป็นต้น ซิลิกาในวัสดุปอซโซลานต้องอยู่ในรูปอสัณฐาน คือไม่เป็นผลึก เพราะถ้าเป็นผลึก ซิลิกาจะเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา การผสมวัสดุปอซโซลานลงในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่วนมากจะทำให้ความร้อนจากปฏิกิริยาให้ไฮเดรชันลดลง กำลังระยะแรกลดลงเพิ่มความสามารถในการต้านทานสารละลายซัลเฟต ลดปฏิกิริยาอัลคาไลน์ซิลิกา ปริมาณวัสดุวัสดุปอซโซ

ลานที่ใช้อยู่ระหว่างร้อยละ 15 ถึง 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน การใช้วัสดุปอซโซลานนอกจากจะเป็นการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังทำให้ปูนซีเมนต์ราคาถูกลงด้วย

4) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นปูนซีเมนต์ที่ได้จากการบดตะกรันเตาถลุงเหล็กกับปูนเม็ด ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการถลุงเหล็กประกอบด้วย CaO SiO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนมากแล้วจะใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กในช่วงร้อยละ 25 ถึง 70 ของวัสดุซีเมนต์ ตะกรันเตาถลุงเหล็กเมื่อทำปฏิกิริยาจะให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเหมือนกับผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3S แต่ปฏิกิริยาของตะกรันเตาถลุงเหล็กจะช้ากว่า ดั้งนั้นการรับกำลังในระยะแรกจะต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นก็ต่ำกว่า นอกจากนี้การต้านทานต่อสารละลายซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็กจะดีขึ้น เพราะปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ปูนซีเมนต์ชนิดนี้สามารถใช้งานคอนกรีตหลาและนิยมใช้สำหรับโครงสร้างคอนกรีต ในทะเล แต่ในประเทศไทยไม่มีการผลิตปูนซีเมนต์ชนิดนี้

5) ปูนซีเมนต์ซัลเฟตสูง ทำจากการบดตะกรันเตาถลุงเหล็กประมาณ ร้อยละ 80 ถึง 85 กับสารแคลเซียมซัลเฟต (ยิปซัมที่ผ่านการเผาขจัดน้ำ) ประมาณร้อยละ 10 ถึง 15 และปูนเม็ดประมาณร้อยละ 5 ปูนซีเมนต์ชนิดนี้มีความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำกว่าและทนต่อสารซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนของกรด เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความคงทนต่อการกัดกร่อน เช่น ใครทำท่อคอนกรีตสำหรับน้ำทิ้ง

6) ปูนซีเมนต์ปอร์ดแลนด์แข็งตัวเร็วพิเศษ ทำจากการบดแคลเซียมคลอไรด์ ประมาณร้อยละ 1 ถึง 2 กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3) แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ให้ก่อตัวและแข็งตัวเร็วขึ้นเนื่องจากปูนซิเมนต์ชนิดนี้แข็งตัวเร็วมาก จึงไม่ควรเก็บไว้นานและเหมาะสำหรับใช้ในการทำคอนกรีตที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อต้องการกำลังระยะแรกสูงเป็นพิเศษ

7) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กำลังระยะแรกสูงพิเศษ ทำได้ด้วยการบดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อเพิ่มความละเอียดให้สูงถึง 7,000 ถึง 9,000 ตารางเซนติเมตร/n และเพิ่มปริมาณยิปซัมด้วย SO_3 เนื่องจากมีความละเอียดมากจึงทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วทำให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาให้ไฮเดรชั่นในระยะแรกสูง และกำลังระยะแรกก็สูงด้วย ปูนซีเมนต์นี้ใช้ในงานประเภทเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็วพิเศษ

8) ปูนซีเมนต์งานก่อ เป็นปูนซีเมนต์ที่ทำจากการบดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับหินปูน และสารกักกระจายฟองอากาศ หรือทำจากการบดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนกับปูนขาว วัสดุเฉื่อย และสารกักกระจายฟองอากาศ ปูนซีเมนต์ชนิดนี้มีความเป็นพลาสติกมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และมีกำลังต่ำ มีความสามารถในการอุ้มน้ำดี เหมาะสำหรับงานก่ออิฐเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ผสม ข้อควรระวังคือห้ามนำปูนซีเมนต์งานก่อมาใช้สำหรับงานคอนกรีตโครงสร้าง

9) ปูนซีเมนต์ขยายตัว ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีจุดอ่อนคือจะหดตัวเมื่อตากแห้งทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้น จึงได้มีการพัฒนาปูนซีเมนต์ที่มีการหดตัวน้อย โดยใช้หลักการของการขยายตัวเริ่มแรกก่อนที่จะมีการหดตัวการขยายตัวของปูนซีเมนต์ขยายตัว อาศัยการทำให้เกิดสารเอททริงไกต์โดยการใส่สารแคลเซียมอลูมิเนตและสารซัลเฟต หรืออาจใช้การบดสารแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา และเมื่อทำการปรับส่วนผสมให้พอเหมาะ สามารถทำให้เกิดการขยายตัวเริ่มแรกและการหดตัวภายหลังมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้สารเพิ่มการขยายตัวสามารถผลิตได้จากส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์ ยิปซัม และ แคลเซียมออกไซด์ ซึ่งต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสมและนำไปใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในสัด ส่วนที่พอเหมาะด้วยจึงจะสามารถชดเชยการหดตัวของปูนซีเมนต์ได้

10) ปูนซีเมนต์ก่อตัวและแข็งตัวเร็ว การเกิดสารเอททริงไกต์ในปริมาณมาก สามารถทำให้ปูนซีเมนต์ก่อตัวได้ภายในเวลา 2 ถึง 45 นาที และมีกำลังได้ภายใน 1 ถึง 2 ชั่วโมง ปูนซีเมนต์ก่อตัวและแข็งตัวเร็วจะมียิปซัมหรือแคลเซียมซับโฟอลูมิเนตผสมอยู่มาก ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ชนิดนี้จะทำให้เกิดความร้อนและเกิดเอททริงไกต์ขึ้นจำนวนมากก่อนที่แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยา ซีเมนต์เพสต์จะมีกำลังได้รวดเร็วและปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกตจะเกิดขึ้นภายหลัง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้เหมาะสำหรับงานซ่อมแซมที่ต้องใช้งานอย่างเร่งด่วน

11) ปูนซีเมนต์บ่อน้ำมัน ใช้สำหรับงานบ่อน้ำมัน เพื่อป้องกันน้ำใต้ดินเข้ามาในหลุมเจาะน้ำมัน ปูนซีเมนต์จะต้องตัวช้าภายใต้อุณหภูมิ ความดัน และทนสภาพที่มีการกัดกร่อนสูง อุณหภูมิในบ่อน้ำมันที่ลึกมากอาจสูงเกิน 260 องศาเซลเซียส ปูนซีเมนต์จากผสมกับน้ำจนเป็นน้ำโคลนและสูบส่งลงในบ่อน้ำมัน ปูนซีเมนต์ชนิดนี้จะมี อยู่น้อยมาก อยู่ประมาณร้อยละ 3 ถึง 4 ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราพญานาคกับแท่นเจาะ ซึ่งผลิตสำหรับส่งออกไปยังต่างประเทศ

12) ปูนซีเมนต์อลูมินาสูง เป็นปูนซีเมนต์อีกชนิดหนึ่งที่ใช้กันมากในต่างประเทศ ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ผลิตจากหินปูนและบอกไซด์ ซึ่งประกอบด้วยอลูมินาออกไซด์ของเหล็กและซิลิกา อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประมาณ 1,600 องศาเซลเซียส ปูนซีเมนต์ชนิดนี้มีปริมาณของอลูมินาผสมอยู่ประมาณร้อยละ 40 ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และกำลังระยะแรกสูงกำลังของปูนซีเมนต์อลูมินาสูงที่อายุ 24 ชั่วโมง มีกำลังสูงเท่ากับหรืออาจสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาที่อายุ 28 วัน นอกจากนี้คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ชนิดนี้ทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตและกรดเพราะมีความทึบน้ำ ข้อควรระวังสำหรับการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ คือกำลังของคอนกรีตลดลงเนื่องจากการแปรสภาพของสารประกอบอลูมิเนตโดยเฉพาะ เมื่ออุณหภูมิสูงและความชื้นสูง การใส่ซิลิกาฟูมสามารถทำให้คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์อลูมินาสูงมีกำลังรับแรงดีขึ้น ข้อควรระวังเพิ่มเติมของการใช้ปูนซีเมนต์อลูมินาสูงสุดคือไม่ใช้ผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพราะจะทำให้เกิดการก่อตัวอย่างฉับพลัน

2.7 ดินลูกรัง

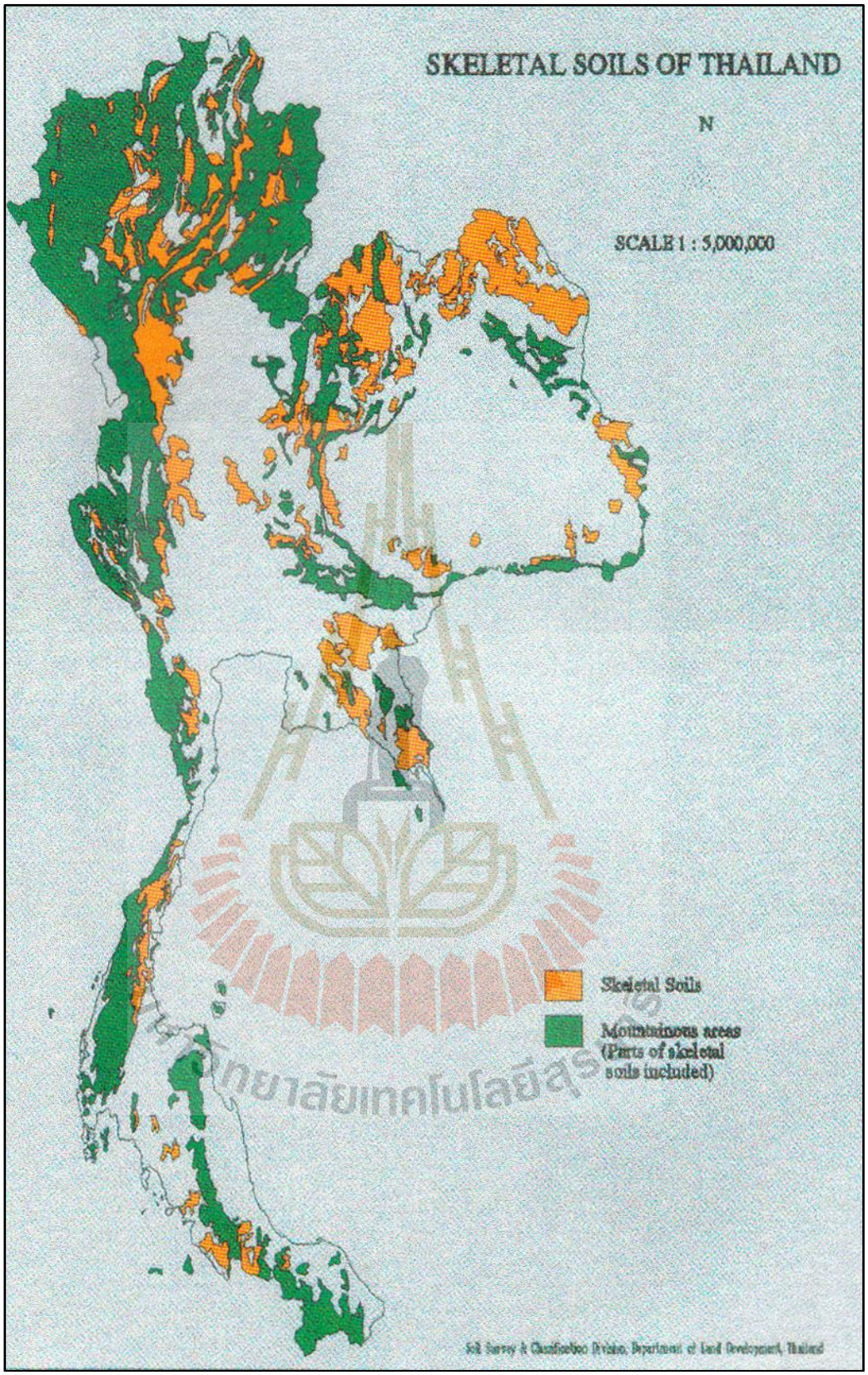
ดินลูกรังจัดอยู่ในกลุ่มดิน Skeletal Soil หรือดินตื้น เป็นดินที่มีชั้นศิลาแลง (Laterite) เกิดขึ้นในหน้าตัดดิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขบวนการสลายตัวผุพังต่าง ๆ เกือบสิ้นสุดแล้ว ธาตุอาหารพืชในวัตถุต้นกำเนิดเดิมถูกชะล้างออกไปจากดิน หรืออยู่ในรูปที่พืชไม่อาจนำไปใช้ประโยชน์

ความหมายของดินลูกรัง หรือดินปนกรวด (Skeletal Soil) ตามระบบอนุกรมวิธานดิน กระทรวงเกษตรและสหรัฐอเมริกา หมายถึงดินที่มีชิ้นส่วนหยาบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร มากกว่าร้อยละ 35 โดยปริมาตร และมีอนุภาคดินที่พอจะแทรกอยู่ในช่องว่างที่มีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร ภายในชั้นควบคุมวงศ์ดิน ส่วนนิยามของกองสำรวจดิน กรมพัฒนาที่ดิน หมายถึง เศษส่วนหินและ/หรือก้อนกรวด (คณะกรรมการกำหนดมาตรการและจัดทำเอกสารอนุรักษ์ดินและน้ำ และการจัดการที่ดิน, มมป)

ดินลูกรังเกิดจากการผุพังของหินในสภาพภูมิอากาศชื้น มีสมบัติเฉพาะตัว คือ สามารถแข็งตัวได้เมื่อทิ้งไว้ในอากาศ ลักษณะของดินลูกรัง ได้แก่ ดินที่มีชิ้นส่วนหยาบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร เป็นปริมาณร้อยละ 35 หรือมากกว่า โดยปริมาตร ที่มีความลึกไม่เกิน 50 เซนติเมตร จากผิวดิน เป็นได้ทั้ง ดินทราย (Sandy- Skeletal) ดินร่วน (Loamy- Skeletal) และ ดินเหนียว (Clay- Skeletal) เกิดได้ในทุกสภาพพื้นที่ (Landform) ดินลูกรังส่วนใหญ่มักจะมีสีแดง แต่จะมีสีแดงเข้มหรือแดงอ่อนขึ้นอยู่กับปริมาณของอ๊อกไซด์ของเหล็กที่ปนอยู่

สมบัติของดินลูกรังจะขึ้นอยู่กับชนิดของต้นกำเนิด ชนิดของหินเดิม ส่วนประกอบทางเคมี สภาพภูมิอากาศ ในทางการเกษตรจัดว่าดินลูกรังเป็นดินที่มีปัญหาชนิดหนึ่ง เนื่องจากมีองค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีไม่เหมาะสมสำหรับการเกษตรกรรม เป็นดินตื้น มีกรวด หรือเศษหินปะปนในระดับความลึกของบริเวณการเจริญของรากพืชทั่วไป ทำให้จำกัดการชอนไชของรากพืช ปริมาณเนื้อดินละเอียดมีน้อย ทำให้มีธาตุพืชอาหารต่ำ มีความชื้นที่เป็นประโยชน์ต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อนำดินลูกรังมาบดอัดจะสามารถรับแรงเฉือนได้สูง จึงมักใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในงานวิศวกรรม โดยเฉพาะใช้เป็นวัสดุการทาง เช่น ชั้นรองพื้นทาง พื้นทาง ถมดินในคัดทางเดิน

ประเทศไทยมีสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น ซึ่งเหมาะสมแก่การเกิดดินลูกรัง จึงพบดินลูกรังได้มาก ในภาพรวมประเทศไทยมีพื้นที่ดินลูกรังคิดเป็นร้อยละ 13.4 ของพื้นที่ทั้งประเทศ หรือ 68,765 ตารางกิโลเมตร ดินลูกรังพบได้ในหลายพื้นที่ โดยเฉพาะในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก และภาคเหนือ ส่วนในเขตภาคกลางและภาคเหนือนั้นพบดินลูกรังได้เล็กน้อย ดังรูปที่ 2.5 หินต้นกำเนิดของดินลูกรังในประเทศส่วนใหญ่เป็นหินทรายและหินบะซอลท์ กับดินดาน

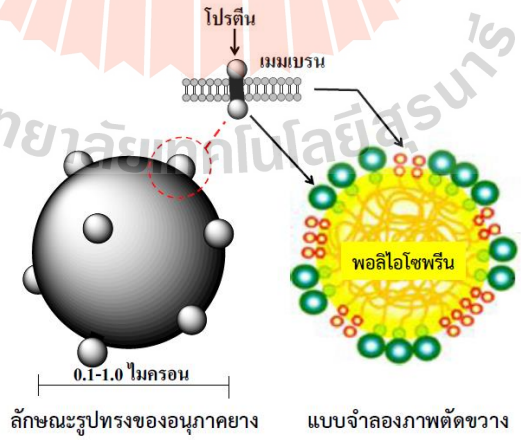


รูปที่ 2.5 การแพร่กระจายของดินปนกรวดในประเทศไทย
(คณะกรรมการกำหนดมาตรการและจัดทำเอกสารอนุรักษ์ดินและน้ำ และการจัดการที่ดิน, มมป)

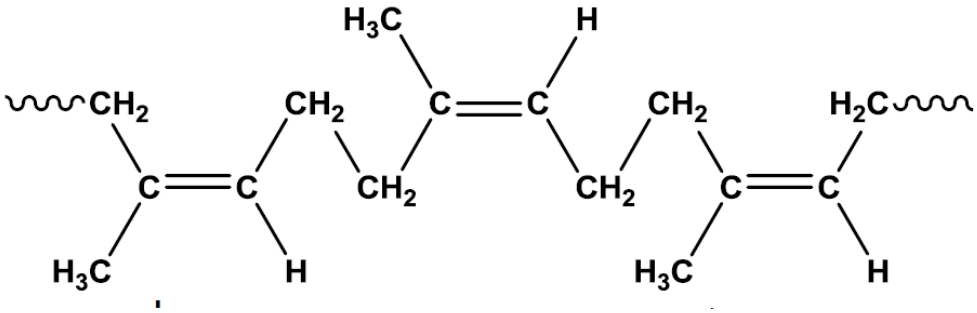
2.8 น้ำยางพารา (Natural Rubber Latex)

ยางพาราหรือยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย การส่งออกยางธรรมชาติส่วนมากอยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ผ่านการแปรรูป เช่น น้ำยางข้น ยางแผ่นรมควัน หรือยางทั้ง โดยประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกน้ำยางข้นรายใหญ่ของโลก ในปี พ.ศ.2558 น้ำยางข้นมีปริมาณการผลิต 964,403 ตัน และกว่าร้อยละ 85 ส่งออกยังต่างประเทศ มีมูลค่า 39,546 ล้านบาท (ปรีดิ์เปรม ทัศนกุล, อดุลย์ ณ วิเชียร และ พิศิษฐ์ พิมพ์รัตน์, 2559) น้ำยางข้นส่วนที่เหลือจากการส่งออกจะใช้ในอุตสาหกรรมภายในประเทศ เพื่อผลิตถุงมือยาง ยางฟองน้ำ ถุงยางอนามัย จุกนมยาง ยางยืด ลูกโป่ง และผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์

น้ำยางธรรมชาติจากต้นยางพาราเป็นของเหลวที่มีองค์ประกอบของแข็ง (Total Solid Content; TSC) ประมาณร้อยละ 36 และมีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 60 โดยคิดเป็นน้ำหนักยางแห้ง (Dry Rubber Content; DRC) ร้อยละ 33 สารจำพวกโปรตีนร้อยละ 1-1.5 ขี้เถ้าไม่เกินร้อยละ 1 น้ำตาลร้อยละ 1 และมีสารประกอบอื่น ๆ เช่น กรดอะมิโน ลิพิด ฟอสโฟลิฟิด และเกลือของกรดไขมัน อยู่ประมาณร้อยละ 0.5-1.60 (สุวดี ก้องพารากุล, 2556) ขนาดอนุภาคของยางธรรมชาติอยู่ในช่วง 0.1-1.0 ไมครอน มีลักษณะค่อนข้างกลม โดยมีโปรตีนและแมมแบรนล้อมรอบอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของอนุภาค ดังรูปที่ 2.6 ยางธรรมชาติเป็นโพลิเมอร์ทางธรรมชาติที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจน มีโครงสร้างทางเคมีคือ ซิส-1, 4-พอลิไอโซพรีน (cis-1, 4-polyisoprene) ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวสูง โดยประกอบด้วยพันธะคู่ของคาร์บอน (C=C) เป็นจำนวนมาก จึงทำให้ยางธรรมชาติเสื่อมสภาพได้โดยง่ายเมื่อถูกแสงแดดหรือหรือความร้อน โดยสังเกตได้จากยางจะแปรสภาพจากเดิมที่สามารถยืดหยุ่นได้ดี กลายเป็นแข็งเปราะและไม่สามารถใช้งานได้ต่อไป



รูปที่ 2.6 แบบจำลองอนุภาคยางธรรมชาติ
(สุวดี ก้องพารากุล อ้างถึง Nawamawat, 2011)



รูปที่ 2.7 ยางพารามีโครงสร้างทางเคมีแบบ ซิส-1, 4-พอลิไอโซพรีน
(สุวดี ก้องพารากุล, 2556)

ยางละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด จึงสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิ จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ยางพารามีสมบัติที่โดดเด่นแตกต่างจากยางสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เป็นผลมาจากโครงข่ายที่เกิดจากการเชื่อมโยงตามธรรมชาติของหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่โมเลกุล โดยสมบัติที่โดดเด่น เช่น สมบัติด้านความยืดหยุ่น (Elasticity) ความทนทานต่อการขัดสี การกระดอน ทนทานต่อการฉีกขาด การเหนียวติดกัน (Track) ดีเยี่ยม แต่ทั้งนี้ ยางพาราก็มีสมบัติบางประการที่ด้อยกว่ายางสังเคราะห์ เช่น การเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อถูกแสงแดดและความร้อน การบวมตัวเมื่อสัมผัสกับตัวทำลายอินทรีย์ (สุวดี ก้องพารากุล, 2556) นอกจากนี้ ยางพารายังมีสมบัติไฮโดรฟิลิก (Hydrophobicity) หรือความไม่ชอบน้ำ (ชัยวุฒิ วัดจัง, 2558) ซึ่งทำให้โครงสร้างของยางธรรมชาติไม่สามารถแตกตัวให้ไอออน หรือเป็นโมลกุลที่ไม่มีขั้วซึ่งไม่สามารถยึดติดกับโมลกุลของน้ำหรือไม่เปียกน้ำ และไม่สามารถขยายขนาดหรือบวมเมื่อสัมผัสน้ำ จากสมบัติดังกล่าวยางพาราจึงมีความสามารถในการดูดน้ำได้น้อยมาก

โดยทั่วไปน้ำยางสดที่ออกมาจากต้นยางจะคงสภาพความเป็นน้ำยางได้ไม่เกิน 3-6 ชั่วโมง เนื่องจากแบคทีเรียในอากาศ และจากเปลือกของต้นยางจะลงไปในน้ำยาง และกินสารอาหารที่อยู่ในน้ำยาง เช่น โปรตีน น้ำตาล เป็นต้น ทำให้แบคทีเรียเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว แต่สิ่งที่เกิดขึ้นจากการย่อยของแบคทีเรียคือ ก๊าซชนิดต่าง ๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน และกรดไขมันระเหยได้ (Volatile Fatty Acid) เมื่อปริมาณกรดที่ระเหยง่ายในน้ำยางเพิ่มมากขึ้น น้ำยางจะเกิดการสูญเสียสภาพ สังเกตได้จากการที่น้ำยางจะค่อย ๆ มีความหนืดมากขึ้น เพราะอนุภาคยางเริ่มจับตัวเป็นเม็ดเล็ก ๆ และค่อยขยายเป็นก้อนใหญ่ขึ้น จนน้ำยางสูญเสียสภาพ เกิดการบูดเน่า และมีกลิ่นเหม็น ซึ่งอัตราการเกิดกระบวนการทั้งหมดจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างไม่ว่าจะเป็นเรื่องอุณหภูมิ

สภาพแวดล้อม ความคงตัวของน้ำยาง พันธุ์ยาง เพื่อป้องกันการสูญเสียสภาพของน้ำยางสด จึงต้องเติมสารเคมีบางชนิดลงไปเพื่อเก็บรักษาน้ำยางให้คงสภาพเป็นของเหลว ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในการเก็บรักษาน้ำยางเรียกว่า สารรักษาสภาพน้ำยาง (Preservative) เช่น แอมโมเนีย (Ammonia) โซเดียมซัลไฟต์ (Sodium sulfite) ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) เป็นต้น

น้ำยางข้น คือ น้ำยางสดที่ทำให้เข้มข้นโดยการหมุนเหวี่ยงหรือการแยกครีม เพื่อแยกส่วนที่เป็นเนื้อยางออกจากเซรุ่ม และเพิ่มปริมาณเนื้อยางแห้งจาก 30% เป็น 60% สำหรับวิธีการหมุนเหวี่ยง ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันเป็นส่วนใหญ่ในประเทศไทย และเพิ่มปริมาณเนื้อยางแห้งจาก 30% เป็น 64% สำหรับวิธีการแยกครีม เนื่องจากน้ำยางสดมีปริมาณน้ำมากเกินไปไม่เหมาะที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนส่ง

กระบวนการผลิตน้ำยางข้น เริ่มจากการรวบรวมน้ำยางสด จากพื้นที่เพาะปลูก และมีการตรวจสอบคุณภาพและผสมสารเคมี ก่อนที่จะนำเข้าเครื่องเหวี่ยง (Certrifuge) เพื่อทำเป็นน้ำยางข้นที่มีความเข้มข้นได้ตั้งแต่ 30%-60% ในปัจจุบันการรักษาสภาพของน้ำยางข้นส่วนใหญ่ใช้สารแอมโมเนีย ซึ่งจำแนกกลุ่มของน้ำยางข้นออกเป็น 2 กลุ่มตามลักษณะของสารเคมีที่ใช้ในการรักษาสภาพ คือ 1) น้ำยางข้นที่รักษาสภาพด้วยแอมโนเมียสูง (High Ammonia Latex; HA) คือ น้ำยางข้นที่รักษาสภาพด้วยสารละลายแอมโมเนียในปริมาณ 0.7% และ 2) น้ำยางข้นที่รักษาสภาพด้วยแอมโมเนียต่ำ (Low Ammonia Latex; LA) เป็นน้ำยางข้นที่รักษาสภาพด้วยแอมโมเนียร่วมกับสารรักษาสภาพปริมาณ 0.2 % ร่วมกับสารเคมีชนิดอื่น น้ำยางข้นที่ได้รับการผสมสารเคมีแล้ว อาจเกิดปฏิกริยาทางเคมีบางประการทำให้น้ำยางมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปบ้างเล็กน้อย

2.9 การปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์ด้วยโพลิเมอร์

โพลิเมอร์ที่ใช้เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงสมบัติของดินซีเมนต์ที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน คือ โพลิเมอร์เคมโรด ซึ่งเป็นสารผสมของน้ำ Acrylic Resin, Calcium Salt, Mineral Oil และ Cellulose ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นระหว่างดินใน Soil Cement & Film former เชื่อมสารประสาน (Binder) ระหว่างเม็ดดิน และเป็นการหน่วงการใช้น้ำ (Water Retention Agent) เมื่อนำโพลิเมอร์ผสมกับดินซีเมนต์แล้วสามารถปรับปรุงสมบัติความพรุนยึดเกาะการซึมผ่านของน้ำ (Water Penetration) และเพิ่มความต้านทานการแตกของดินซีเมนต์ (Fracture Toughness)

2.10 ทบทวนงานวิจัย

การปรับปรุงวัสดุพื้นทางด้วยซีเมนต์ เป็นเทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกาเมื่อปี พ.ศ.2463 ซึ่งโครงสร้างพื้นทางที่ผสมซีเมนต์นั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักจราจรลดปัญหาการแตกร้าวแบบหนังจระเข้บนผิวทางเนื่องจากความล้าของชั้นทาง ลดการแอ่นตัวและการกะเทาะล่อนหลุดของผิวแอสฟัลต์และเพิ่มประสิทธิภาพของชั้นทางในสภาวะเปียกชื้นได้ (ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ สถิตย์พงษ์ อภิเมธีธำรง, 2543) ทั้งนี้ มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงสมบัติของดินซีเมนต์ ดังนี้

ผลการศึกษาของวสันต์ ปั้นสังข์ และคณะ ในปี พ.ศ.2553 ซึ่งได้ทำการศึกษาปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมในการใช้ปรับปรุงวัสดุชั้นพื้นทาง สำหรับหินคลุกและดินจาก 6 แหล่งวัสดุในประเทศไทย โดยวัสดุหินคลุกนำมาจากจังหวัดกาญจนบุรี นครราชสีมา และอุตรดิตถ์ ส่วนวัสดุมวลรวมนำมาจากจังหวัดเพชรบุรี ปราจีนบุรี และเพชรบูรณ์ วัสดุตัวอย่างถูกนำมาทดสอบในด้านกำลังรับน้ำหนักบรรทุกรวมทั้งความคงทนของวัสดุในห้องปฏิบัติการซึ่งอัตราส่วนของซีเมนต์อยู่ในช่วง 1 - 8% โดยน้ำหนัก ผลการวิจัยทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนกับค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุขึ้นมาใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมในการออกแบบส่วนผสมของดินซีเมนต์ให้กำลังรับน้ำหนักที่เพียงพอและทนทานต่อสภาวะการใช้งาน ผลการศึกษาพบว่า วัสดุแหล่งนครราชสีมาควรมีความสึกหรอไม่เกิน 14% ถึงจะมีความเหมาะสมกับการนำมาใช้งาน และ ถ้าหากต้องการให้วัสดุแหล่งนครราชสีมา มีความคงทนเหมาะสมกับการนำมาใช้งานควรเพิ่มปริมาณซีเมนต์ให้มากกว่า 3% แต่ในด้านกำลังก็จะเพิ่มขึ้นมากขึ้นกว่าเกณฑ์ตามจากมาตรฐานกรมทางหลวง

ผลการศึกษาของจตุรงค์ เสาวภาคย์ไพบูลย์ และคณะ ในปี พ.ศ.2553 ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และน้ำยาโพลิเมอร์เคมโรด โดยทำการทดสอบกับตัวอย่างดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วย 0% ซีเมนต์ และ 0% เคมโรด, 5% ซีเมนต์ และ 0% เคมโรด และ 5% ซีเมนต์ และ 5% เคมโรด ตามลำดับที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ในห้องปฏิบัติการซึ่งทำการทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัด เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างดินลูกรังแต่ละวิธีการปรับปรุงดิน จากผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ 5% และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กับน้ำยาโพลิเมอร์เคมโรดที่ 5% จะมีค่ามากกว่าตัวอย่างดินลูกรังที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพอยู่ไม่ต่ำกว่า 1,200 และ 1,300% ตามลำดับ และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของตัวอย่างดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ 5% และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กับน้ำยาโพลิเมอร์เคมโรดที่ 5% จะมีค่ามากกว่าตัวอย่างดินลูกรังที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพอยู่ 3,000 และ 4,900% ตามลำดับ ดังนั้นการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และน้ำยาโพลิเมอร์เคมโรดจะให้ค่าที่สูงที่สุด

ผลการศึกษาของพีรวัฒน์ ปลาเงิน ในปี 2555 ได้ทำการประยุกต์ใช้น้ำยางธรรมชาติผสมดินซีเมนต์ (Soil-Cement) เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติจะทำหน้าที่เป็นเสมือนตัวประสานและสามารถป้องกันการรั่วซึมของได้ได้ดี โดยคณะผู้วิจัยได้พัฒนาคอนกรีตผสมน้ำยางพารา (Concrete Rubber Latex) สร้างแบบจำลองคลองชลประทานทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และศึกษาการรั่วซึมของน้ำ ผลการวิจัยพบว่าคลองชลประทานที่มีส่วนผสมของน้ำยางพารา 7.5% , 10% ,12.5% และ 15% มีค่าอัตราการรั่วซึม 3.43 มม./วัน 2.99 มม./วัน 2.83 มม./วัน และ 8.20 มม./วัน ในขณะที่แบบจำแบบที่ไม่ผสมน้ำยางพาราอัตราการรั่วซึม 5.40 มม./วัน

การศึกษาของรัฐวุฒิ รู้แทนคุณ และคณะ ในปี พ.ศ.2549 ได้ทำการศึกษาผลจากการผสมน้ำยางพาราในอิฐดินซีเมนต ชนิดของน้ำยางพาราที่ใช คือ น้ำยางรักษาสภาพแบบแอมโมเนียสูง (HA) น้ำยางสำหรับงานหลอเบา (Casting) และกาวยาง (Latex Adhesive) โดยน้ำยางรักษาสภาพแบบแอมโมเนียสูงถูกนำมาผสมกับอิฐดินซีเมนต ที่อัตราสวนตอปริมาตรน้ำ 10% 15% และ 20% ตามลำดับ น้ำยางสำหรับงานหลอเบาผสมกับอิฐดินซีเมนตโดยใชอัตราสวนผสมตอปริมาตรน้ำ 20% และกาวยางผสมกับอิฐดินซีเมนตโดยใชอัตราสวนผสมตอปริมาตรน้ำ 15% การทดสอบคุณสมบัติของอิฐดินซีเมนตมีสี่ประเภทคือการทดสอบกำลังรับแรงอัด การทดสอบกำลังรับแรงดัด การทดสอบการดูดซึมน้ำ และการทดสอบการรับแรงกระแทก

โดยผลการทดสอบการรับแรงอัด พบวา เมื่อมีรอยละของน้ำยางรักษาสภาพแบบแอมโมเนียสูง(HA) มากขึ้นกำลังรับแรงอัดของอิฐมีแนวโนมลดลง ความสัมพันธเปนแบบแปรผกผันและไมมีจุดวกกลับ ผลของอิฐดินซีเมนตผสมน้ำยางสำหรับงานหลอเบา และอิฐดินซีเมนตผสมกาวยาง มีกำลังรับแรงอัดสูงกวาอิฐดินซีเมนตผสมน้ำยางรักษาสภาพ HA ที่อัตราสวนผสมเทาเทียมกัน แตยังคงน้อยกวาอิฐดินซีเมนตที่ไมมีสวนผสมของน้ำยางพารา

ผลการทดสอบการรับแรงดัดพบวา เมื่อมีรอยละของน้ำยางรักษาสภาพแบบแอมโมเนียสูง (HA) มากขึ้นกำลังรับแรงดัดของอิฐมีแนวโนมเพิ่มขึ้น อิฐผสมน้ำยาง HA 15% ใหกำลังรับแรงดัดสูงสุดคือ183.06% ของอิฐธรรมดา แตที่ปริมาณน้ำยาง HA 20% กำลังรับแรงดัดกลับมีคาต่ำลงเหลือ 171.21% ดังนั้นการเพิ่มของกำลังรับแรงดัดของอิฐมีจุดวกกลับที่อัตราสวนน้ำยาง HA 15% น้ำยางสำหรับงานหล่อ เบาอิฐดินซีเมนตผสมกาวยางมีกำลังรับแรงดัดสูงกวาอิฐดินซีเมนตผสมน้ำยางรักษาสภาพ HA ที่อัตราส่วนผสมเทากัน

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำพบวา เมื่อมีรอยละของน้ำยางรักษาสภาพแบบแอมโมเนียสูง (HA) มากขึ้นรอยละการดูดซึมน้ำของอิฐที่เวลา 30 นาทีและเวลา 24 ชั่วโมง มีแนวโนมเพิ่มขึ้นความสัมพันธเป็นรูปแบบแปรผันตรงและไมมีจุกวกกลับ ในกลุมของสูตรผสมน้ำยางสำหรับงานหลอเบาและกาวยาง รอยละการดูดซึมน้ำมีคาเพิ่มขึ้นกวาอิฐดินซีเมนตที่มีสวนผสมของน้ำยางพารารักษาสภาพ HA ที่อัตราสวนผสมเทากัน

ผลการทดสอบการรับแรงกระแทก พบวา เมื่อมีรอยละของน้ำยางรักษาสภาพแบบแอมโมเนียสูง (HA) มากขึ้น ความสามารถรับแรงกระแทกของอิฐมีแนวโนมเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราสวน

ผสมน้ำยาง HA เปน15% กำลังรับแรงกระแทกเพิ่มขึ้นถึง 144.30% แตที่ปริมาณน้ำยาง HA 20% กำลังรับแรงกดกลับมีคาต่ำลงเหลือ 128.48% ดังนั้นการเพิ่มของกำลังรับแรงดัดของอิฐมีจุดวกกลับที่อัตราสวนน้ำยาง HA 15% น้ำยางสำหรับงานหลอเบา มีกำลังรับแรงกระแทกเทากับอิฐดินซีเมนตผสมน้ำยางรักษาสภาพ HA ที่อัตราสวนผสมเทาเทียมกัน และอิฐดินซีเมนตผสมกาวยางใหความตานทานแรงกระแทกต่ำกวาอิฐดินซีเมนตผสมน้ำยางรักษาสภาพHA ที่อัตราสวนเท่ากัน แตทุกสวนผสมยังคงสามารถรับแรงกระแทกมากกวาอิฐดินซีเมนตที่ไมมีสวนผสมของน้ำยางพารา

การศึกษาของวีระศักดิ์ ละอองจันทร์ และ สุรัตน์ ศรีจันทร์ ในปี พ.ศ.2552 ได้นำน้ำยางพาราธรรมชาติรักษาสภาพแบบแอมโมเนียอัตราร้อยละ 10 เพื่อรักษาสภาพน้ำยางมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินในด้านการรับกำลังแรงอัดในแนวแกน และแรงเฉือน โดยกำหนดอัตราส่วนผสมน้ำยางพาราธรรมชาติต่อน้ำหนักน้ำสะอาด เท่ากับร้อยละ 0, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 สำหรับการทดสอบการรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test) และร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 สำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) ตัวอย่างทดสอบโดยทำการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน และทำการเก็บตัวอย่างดินด้วยกระบอกผ่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด และขนาด 6 x 6 x 2.5 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงจากนั้นทำการบ่มตัวอย่างทดสอบที่อายุ 1 วัน และ อายุ 7 วัน พบว่า เมื่อทำการผสมน้ำยางธรรมชาติโดยคิดเป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้การรับกำลังอัดและแรงเฉือนสูงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างดินที่ไม่ทำการผสมน้ำยางพาราธรรมชาติ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าน้ำยางพาราธรรมชาติสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติดินชนิด SM-SC และทำการปรับปรุงพลังงานเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดและแรงเฉือนของดินได้ดี

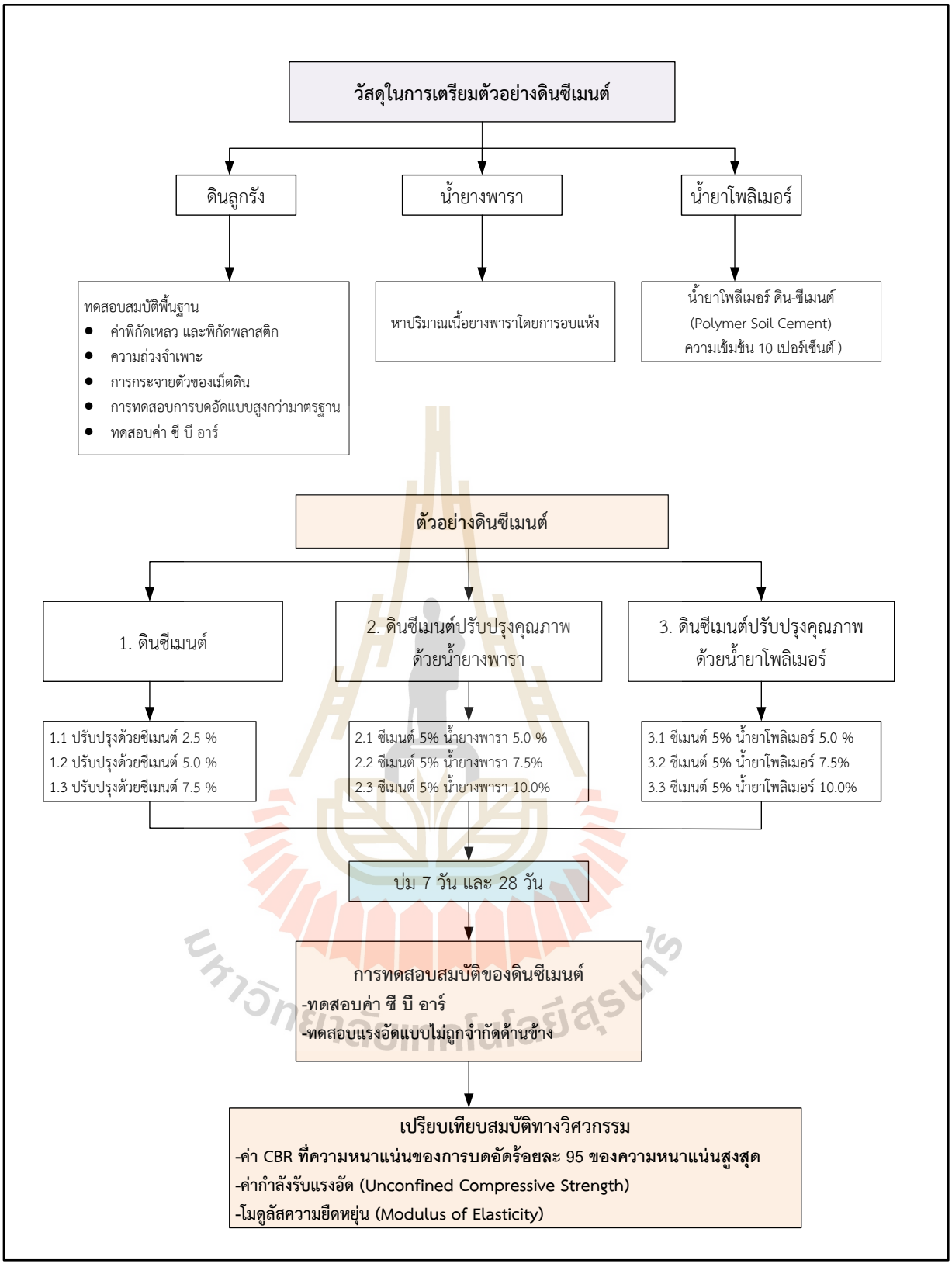
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

การดำเนินโครงการประยุกต์ใช้ยางพาราและดินซีเมนต์สำหรับงานก่อสร้างถนนมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินซีเมนต์ กับดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา และน้ำยาโพลิเมอร์ เพื่อให้การดำเนินงานบรรลุวัตถุประสงค์การวิจัยดังกล่าว ผู้วิจัยได้กำหนดแผนดำเนินการวิจัย ดังรูปที่ 3.1 โดยจะแสดงรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินงานตามลำดับ ในข้อที่ 3.1 – 3.5 ดังนี้

1. วัสดุในการวิจัย
2. การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของวัสดุมวลรวมดิน
3. เงื่อนไขการทดลองปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์
4. การเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์
5. การทดสอบแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยนี้ประกอบด้วย วัสดุมวลรวมดิน (Soil Aggregate) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 น้ำยาโพลิเมอร์ และน้ำยางพารา ดังรายละเอียดในข้อที่ 3.1.1-3.1.3

3.1.1 วัสดุมวลรวมดิน (Soil Aggregate)

วัสดุมวลรวมดิน (Soil Aggregate) หรือ ดินลูกรังเป็นวัสดุหลักในการผลิตดินซีเมนต์ โดยการวิจัยนี้ ใช้ดินลูกรังจากแหล่งดินในเขตจังหวัดนครราชสีมา ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพดังรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.2 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุมวลรวมดิน (Soil Aggregate)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

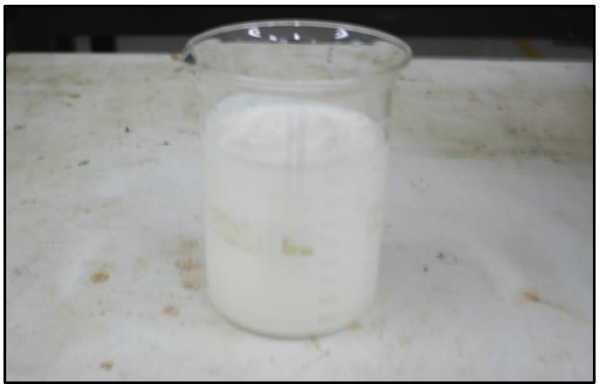
3.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนประเภทที่ 1

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เหมาะสำหรับงานโครงสร้างอาคาร บ้านพักอาศัย อาทิ ฐานราก เสา คาน พื้น สำหรับการวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราช้าง ดังรูปที่ 3.3

รูปที่ 3.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราช้าง

3.1.3 น้ำยางพารา

น้ำยางพาราที่ใช้เป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์สำหรับการวิจัยนี้ เป็นน้ำยางข้นรักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย (High Ammonia Latex) มีลักษณะทางกายภาพดังรูปที่ 3.4 และสมบัติทางกายภาพ ดังตารางที่ 3.1 ทั้งนี้ เมื่ออบน้ำยางพาราจนแห้ง พบว่า มีปริมาณเนื้อยาง ร้อยละ 55 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการทดสอบปริมาณเนื้อยางที่อยู่ในน้ำยางเข้มข้นนี้ จะใช้ในการคำนวณเพื่อหาปริมาณน้ำยางพาราที่ใช้ผสมกับน้ำ เพื่อให้ได้ของเหลวที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์แต่ละเงื่อนไขการทดลอง



รูปที่ 3.4 ลักษณะทางกายภาพของน้ำยางข้นรักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย

ตารางที่ 3.1 สมบัติทางกายภาพของน้ำยางข้นรักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย

Contents Name	น้ำยางข้นรักษาสภาพด้วยแอมโนเนีย (High Ammonia Latex; HA)
Total Solids Content %	61.50 Min
Dry Rubber Content %	60.00 Min
Non-Rubber Content %	2.00 Max
Ammonia Content (on total weight)%	0.65-0.75
pH Value	11.00 Max
KOH Number	0.85 Max
Volatile Fatty Acid Number	0.05 Max
M.S.T. @ 55% TS., Sec.	650 Min
Specific Gravity at 25° C	0.94 Min
Magnesium Content (on solids), ppm	60.00 Max

3.1.4 น้ำยาโพลิเมอร์

น้ำยาโพลีเมอร์ ดิน-ซีเมนต์ (Polymer Soil Cement) ความเข้มข้นร้อยละ 10 จัดจำหน่ายโดยบริษัทเอ็มไอเอ็มซิสเต็มจำกัด (M.I.M. Systems Co., Ltd.) ซึ่งมีสมบัติดังตารางที่ 3.2

รูปที่ 3.5 ลักษณะทางกายภาพของน้ำยาโพลิเมอร์ ดิน-ซีเมนต์ (Polymer Soil Cement)

ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกายภาพของน้ำยาโพลิเมอร์ดิน-ซีเมนต์ (Polymer Soil Cement)

รายการ	**ผลการทดสอบ**
Adhesion	100 %
Flexibility	>230 %
Tensile Strength	290 psi
Accelerated Aging	Passed 200 Hrs
Solid Volume	> 14 %
Solid Wight	> 12 %
Non Volatile	> 12 %
Viscosity	5-10 Kcps
VOC	< 50 gm/l
Density	1.01 gr/ml
Dry time (touch)	3 mins
Dry time to Recoat	1 hrs
Dry time to Fully cured	7 day
UV Resistance	Excellent
Color	Miley white

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2 การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของวัสดุมวลรวมดิน

การทดสอบสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมดิน ประกอบด้วย การหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติก (Plastic Limit) ของดินตามมาตรฐาน ASTM: D 2487 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity of Soil Solid) ตามมาตรฐาน ASTM: D 854 การหาค่าการกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain size analysis) ตามมาตรฐาน ASTM: D 422 ทดสอบหาค่าซี บี อาร์ (California Bearing Ratio Test) ตามมาตรฐาน ASTM: D 1883 – 67 และการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test) ตามมาตรฐาน ASTM: D 1557 ดังรายละเอียดในข้อที่ 3.2.1-3.2.5

3.2.1 การหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของดิน

ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit; LL) เป็นการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นในมวลดินขณะที่ดินเริ่มเปลี่ยนสภาพจากของเหลวไปอยู่ในสภาพพลาสติก หาได้โดยการปาดดินที่ผสมน้ำจนพอเหมาะด้วยเครื่องมือทดลองมาตรฐานให้เป็นร่องห่างประมาณ 1 ซม. ในถ้วยโลหะทดลองแล้วหมุนกระเดื่องเคาะด้วยโลหะจนรอยบากนั้นไหลเคลื่อนมาบรรจบกันยาว 1 ซม. พอดี และจำนวนครั้งที่หมุนเคาะถ้วยโลหะจะต้องเท่ากับ 25 ครั้ง แรงเฉือนของดินจุดนี้จะมีค่าเท่ากับ 25 กรัมต่อตารางเซนติเมตร

ค่าพิกัดพลาสติก (Plastic Limit; PL) คือเปอร์เซ็นต์ความชื้นในมวลดินขณะที่ดินเริ่มเปลี่ยนสภาพจากพลาสติกไปอยู่ในสภาพกึ่งแข็ง หาได้โดยการปั้นดินให้เป็นเส้นยาวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/8 นิ้ว และคลึงบนแผ่นกระจกให้น้ำระเหยไปจนเส้นดินเริ่มมีรอยปริแตกเกิดขึ้นโดยรอบ หากมวลดินนั้นมีทรายอยู่มาก ทรายซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่มีจุดพลาสติก (Non Plastic) จะทำให้ไม่สามารถปั้นให้เป็นเส้นได้

3.2.2 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity of Soil)

ความถ่วงจำเพาะของดิน คือ อัตราส่วนของน้ำหนักดินต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับดิน ณ อุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งเป็นสมบัติที่แสดงให้ทราบถึงลักษณะทั่วไปของดิน

การหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินทำได้โดยใช้ขวดหา ถ.พ. (Pycnometer) ซึ่งมี 2 ขนาด คือ ขวดตวงปากเล็ก (Volumetric Flask) ขนาด 100 – 500 ลบ.ซม. ซึ่งเหมาะสำหรับดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่ และขวดจุกแก้วขนาด 25 -100 ลบ.ซม. สำหรับดินเม็ดละเอียด แต่วิธีการทดลองส่วนใหญ่เหมือนกันจึงขอกล่าวเฉพาะการใช้ขวดแบบแรกเท่านั้น

3.2.3 การหาค่าการกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain Size Analysis)

การกระจายของขนาดอนุภาคมวลรวมมีผลต่อคุณสมบัติในการรับน้ำหนักของมวลรวม การทดลองนั้น กระทำได้ง่ายด้วยการร่อนดินผ่านตะแกรงที่มีช่องเปิดเป็นรูตารางสี่เหลี่ยมมาตรฐานขนาดต่าง ๆ กัน โดยให้ผ่านตะแกรงจากขนาดใหญ่ จนถึงขนาดเล็กที่มีช่องผ่าน 0.075 มิลิเมตร แล้วเปรียบเทียบน้ำหนักที่ผ่านหรือค้างตะแกรงขนาดต่าง ๆ กับน้ำหนักทั้งหมดของตัวอย่าง ผลการทดสอบค่าการกระจายของเม็ดดินมักแสดงให้เห็นชัดเจนด้วยการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของมวลรวมในสเกลล็อกการิธึม (Logarithm) บนแกนนอน และเปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของอนุภาคมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าที่ระบุ (Percent Finer) อยู่บนแกนตั้ง ซึ่งเรียกว่า “กราฟการกระจายของขนาดเม็ดดิน” (Grainsize Distribution Curve)

3.2.4 การทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test)

การทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test) เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสูงสุดของดินกับปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ใช้ในการบดอัด

การบดอัดเป็นกระบวนการที่ใช้น้ำหนักจากเครื่องกลกดหรือสั่นกระแทก ทำให้เม็ดอนุภาคมวลรวมเบียดชิดกันเพื่อเพิ่มความแน่น เพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือนและรับน้ำหนักบดทับได้สูงขึ้น ขณะเดียวกันก็ลดการทรุดตัว ลดการซึมผ่านของน้ำใต้ดิน กระบวนการบดอัดนี้ใช้น้ำเป็นตัวหล่อลื่น ถ้าเปอร์เซนต์ความชื้นในวัสดุมวลรวมมีพอเหมาะ (Optimum Moisture Content) ก็จะสามารถบดอัดดินความแน่นสูงสุด แต่ถ้ามวลรวมมีความชื้นมากเกินไปน้ำจะไปหุ้มเคลือบรอบ ๆ เม็ดดินทำให้อณูภาคของมวลรวมแยกตัวห่างจากกันหรือถ้าน้ำมีน้อยเกินไปการหล่อลื่นไม่ดีพอที่จะช่วยให้การบดอัดอนุภาคเบียดตัวได้ชิดกันเท่าที่ควร มวลรวมแต่ละแหล่งจะมีค่าความแน่นไม่เท่ากัน ถึงแม้จะใช้พลังงานการบดอัดเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมแต่ละแหล่งมีขนาดแต่ละส่วนประกอบไม่เหมือนกัน รูปร่างลักษณะของอนุภาคมวลรวมจะมีผลต่อการบดอัด ถ้าอนุภาคมีเหลี่ยมมีมุมก็จะบดอัดง่ายและแน่นรับน้ำหนักได้สูงกว่ามวลรวมที่ไม่มีเหลี่ยมมุม หรือแบน

วิธีบดอัดดินให้ได้ความแน่น (Density) สูงตามความต้องการหรือตามจุดประสงค์ของการใช้งาน จะต้องอาศัยน้ำเป็นตัวหล่อลื่น แต่ถ้าน้ำมีอยู่มากเกินไป น้ำจะไปหุ้มเคลือบรอบ ๆ มวลดิน ทำให้อณูของเม็ดดินแยกตัวห่างจากกัน หรือถ้ามีน้ำอยู่น้อยเกินไป การหล่อลื่นไม่ดีพอที่จะช่วยให้การบดอัดเม็ดดินเบียดชิดกันเท่าที่ควร ด้วยเหตุผลและข้อเท็จจริงดังกล่าว RR. Proctor (1933) ได้กำหนดวิธีทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับความแน่น (Density) ของดินที่ได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งต่อมาได้เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้ทดสอบการบดอัดดินในงานก่อสร้างโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีทดสอบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) โดยเฉพาะการทดสอบเพื่อควบคุมงานก่อสร้างถนน สนามบิน (Runway) เขื่อนดิน พื้นโรงงาน ฯลฯ ในปัจจุบัน ยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งได้วิวัฒนาการมีขนาดใหญ่ขึ้น บรรทุกน้ำหนักได้มากขึ้นหลายเท่าตัว พลังงาน (Energy) ที่ใช้ในการบดอัดก็จำเป็นจะต้องเพิ่มขึ้นด้วย จึงได้มีการกำหนดวิธีทดสอบการบดอัดดินโดยการเพิ่มพลังงาน

ให้สูงขึ้น เพื่อจะได้ฐานดินที่มีความแน่นสูง รับน้ำหนักได้มาก เรียกว่า วิธีทดสอบแบบโมดิฟายด์ (Modified Proctor Test)

3.2.5 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์ (California Bearing Ratio Test)

วิธีการทดสอบนี้เป็นการหาค่าเปรียบเทียบค่าความสามารถในการรับน้ำหนัก (Bearing Value) กับวัสดุหินมาตรฐาน เพื่อทดสอบวัสดุมวลรวมดิน การทดสอบ California Bearing Ratio Test (CBR) เป็นการทดสอบวัดแรงเฉือนของดินที่บดอัดแน่นจนได้ค่า γ_d สูงสุด โดยใช้ท่อนเหล็กทรงกระบอกตัน (Piston) ที่มีพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว กดลงบนดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ด้วยอัตรา 0.05 นิ้วต่อวินาที ค่าแรงเฉือนที่อ่านได้นำไปหารด้วยค่าแรงเฉือนมาตรฐานที่ได้จากการทดลองกดท่อนเหล็กบนหินที่อัดแน่นตามระยะความลึกของการกดที่เท่ากัน ค่าตัวเลขที่ได้นี้เรียกว่า เปอร์เซนต์ ซี.บี.อาร์. ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

ค่าเปอร์เซนต์ ซี.บี.อาร์. โดยทั่วไปแล้วใช้ค่าอัตราส่วนของแรงกดที่ความลึก 0.1 นิ้ว แต่ถ้าผลปรากฏว่าเปอร์เซนต์ ซี.บี.อาร์. ของแรงกดที่ความลึก 0.2 นิ้ว สูงกว่าที่ 0.1 นิ้ว การทดลองควรจะกระทำซ้ำอีกครั้ง และถ้าเปอร์เซนต์ ซี.บี.อาร์. ยังคงเป็นเช่นเดิม ก็ให้ใช้ค่า ซี.บี.อาร์. ที่ความลึก 0.2 นิ้ว ขั้นตอนการทดสอบ ซี.บี.อาร์. ดูได้ในรายละเอียดการทดสอบที่จะกล่าวต่อไป ผลที่ได้จากการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์. ของวัสดุนั้นสามารถนำไปใช้ออกแบบชั้นดินคันทาง ชั้นรองพื้นทาง และชั้นพื้นทางของทางลาดยางและทางคอนกรีต

$$\text{CBR} = \frac{Load_{test}}{Load_{standard}} \times 100\% \qquad (3.1)$$

โดยที่

$Load_{test}$ ค่าแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบ

$Load_{standard}$ ค่าแรงเฉือนมาตรฐาน ได้จากการทดลองกดท่อนเหล็กกลมตันที่มีพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้วบนหินบดอัดมาตรฐาน มีค่าระหว่างระยะทรุดกับแรงกด/พื้นที่

ตารางที่ 3.3 ค่า Standard Unit Load ที่ความลึกต่าง ๆ

ระยะกดลึก (นิ้ว)	แรงกด/พื้นที่ (ปอนด์/ตร.นิ้ว)
0.1	1000
0.2	1500
0.3	1900
0.4	2300
0.5	2600

การทดสอบ California Bearing Ratio Test เป็นการทดสอบตัวอย่างวัสดุที่ผ่านการบดอัดที่ค่าความชื้นที่ให้ความหนาแน่นสูงสุด (Maximum Water Content) เพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. ที่ค่าความหนาแน่นต่าง ๆ กัน จากการประมาณค่าความหนาแน่นสูงสุดที่ได้จากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction)

รูปที่ 3.6 การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์

รูปที่ 3.7 การติดตั้งอุปกรณ์ ในการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3 เงื่อนไขการทดลองปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์

การปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ ด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และน้ำยางพารา โดยใช้อัตราส่วน โดยน้ำหนักของส่วนผสมที่แตกต่างกันทั้งหมด 9 กรณี ดังตารางที่ 3.4 และแสดงส่วนผสมของแต่ละตัวอย่างดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขการทดลองปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์

ตัวอย่าง	ส่วนผสมของดินซีเมนต์
1.ดินซีเมนต์	วัสดุมวลรวมดิน+ปูนซีเมนต์ 2.5 %
2.ดินซีเมนต์	วัสดุมวลรวมดิน+ปูนซีเมนต์ 5.0 %
3.ดินซีเมนต์	วัสดุมวลรวมดิน+ปูนซีเมนต์ 7.5 %
4.ดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา	วัสดุมวลรวมดิน+ปูนซีเมนต์ 5.0%+น้ำยางพารา 5 %
5.ดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา	วัสดุมวลรวมดิน+ปูนซีเมนต์ 5.0%+น้ำยางพารา 7.5 %
6.ดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา	วัสดุมวลรวมดิน+ปูนซีเมนต์ 5.0%+น้ำยางพารา 10 %
7.ดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยาโพลิเมอร์	วัสดุมวลรวมดิน+ปูนซีเมนต์ 5.0%+น้ำยาโพลิเมอร์ 5 %
8.ดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยาโพลิเมอร์	วัสดุมวลรวมดิน+ปูนซีเมนต์ 5.0%+น้ำยาโพลิเมอร์ 7.5 %
9.ดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยาโพลิเมอร์	วัสดุมวลรวมดิน+ปูนซีเมนต์ 5.0%+น้ำยาโพลิเมอร์ 10 %

หมายเหตุ ปริมาณปูนซีเมนต์ หมายถึง ค่าร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมดิน
ปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์ หมายถึง ค่าร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำที่เป็นส่วนผสม
ปริมาณน้ำยางพารา หมายถึง ค่าร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำที่เป็นส่วนผสม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.5 ส่วนผสมของแต่ละเงื่อนไขในการทดลองปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์

ตัวอย่าง	น้ำหนักส่วนผสม (กิโลกรัม)					
	ดิน	ปูนซีเมนต์	น้ำ	โพลิเมอร์เข้มข้น ร้อยละ 10	ยางพาราเข้มข้น ร้อยละ 55	รวมน้ำหนักของเหลว
1.ดินซีเมนต์	15	0.375	1.74	-	-	1.74
2.ดินซีเมนต์	15	0.750	3.32	-	-	3.32
3.ดินซีเมนต์	15	1.125	2.11	-	-	2.11
4.ดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา ร้อยละ 5	15	0.375	1.66	-	0.08	1.74
5.ดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา ร้อยละ 7.5	15	0.750	3.02	-	0.30	3.32
6.ดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา ร้อยละ 10	15	1.125	1.73	-	0.38	2.11
7.ดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ ร้อยละ 7.5	15	0.375	1.30	0.43	-	1.74
8.ดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ ร้อยละ 5	15	0.750	1.66	1.66	-	3.32
9.ดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ ร้อยละ 10	15	1.125	0.00	2.11	-	2.11

3.4 การเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์

การทดสอบสมบัติของดินซีเมนต์ จำแนกตัวอย่างเป็น 3 กลุ่ม ประกอบด้วย ดินซีเมนต์ (ไม่ปรับปรุงคุณภาพ) ดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์แต่ละกลุ่ม แสดงดังข้อที่ 3.4.1-3.4.3 ตามลำดับ

3.4.1 เตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์

เป็นกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพวัสดุมวลรวมดิน ด้วยปูนซีเมนต์ มีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแท่งดินซีเมนต์ ตามลำดับ ดังนี้

1. เตรียมวัสดุมวลดินใส่ในถาด โดยใช้ตัวอย่างดินแห้งประมาณ 4 กิโลกรัม ผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ตราช้าง ด้วยปริมาณที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 2.5 ร้อยละ 5 และร้อยละ 7.5

โดยน้ำหนักของดินลูกรัง จากนั้น ผสมน้ำด้วยปริมาณ OMC โดยใช้กระบอกตวง ตวงปริมาณน้ำที่ต้องการ แล้วเทใส่ขวดบีบน้ำเกลี่ยดินให้แผ่ทั่วถาด บีบน้ำจากขวดบีบน้ำให้ทั่วผิวดิน คลุกเคล้าให้เข้ากัน แล้วจึงแผ่ดิน บีบน้ำให้ทั่ว ทำการคลุกเคล้าแบบเดิม จนกระทั่งหมดน้ำที่ตวงไว้

2. บดดันดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยใช้แบบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.00 นิ้ว และมีความสูง 5.00 นิ้ว

3. บ่มตัวอย่างเพื่อไม่ให้ความชื้นเปลี่ยนแปลง 7 วัน และ 28 วัน

ก) เตรียมวัสดุมวลรวมดิน

ข) ผสมปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

ค) บดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยใช้ปริมาณน้ำที่ OMC

รูปที่ 3.8 การเตรียมแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์

3.4.2 การเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์

เป็นกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ โดยมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังนี้

1. เตรียมวัสดุมวลดินใส่ในถาด โดยใช้ตัวอย่างดินแห้งประมาณ 4 กิโลกรัม ผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ตราช้าง ด้วยปริมาณ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของดิน

2. จากนั้น ผสมน้ำ กับน้ำยาโพลิเมอร์ ด้วยปริมาณแตกต่างกัน คือ ร้อยละ 5 ร้อยละ 7.5 และ 10.5 ของปริมาณน้ำที่ OMC ก่อนที่จะนำมาผสมวัสดุในถาดผสม โดยใช้กระบอกตวง ตวงปริมาณน้ำที่ต้องการ แล้วเทใส่ขวดบีบน้ำเกลี่ยดินให้แผ่ทั่วถาด บีบน้ำจากขวดบีบน้ำให้ทั่วผิวดิน คลุกเคล้าให้เข้ากัน แล้วจึงแผ่ดิน บีบน้ำให้ทั่ว ทำการคลุกเคล้าแบบเดิม จนกระทั่งหมดน้ำที่ตวงไว้ ทำการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และบ่มแท่งตัวอย่างเพื่อไม่ให้ความชื้นเปลี่ยนแปลง 7 วัน และ 28 วัน เช่นเดียวกับการเตรียมแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์

3.4.3 การเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา

เป็นกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ด้วยน้ำยางพารา มีขั้นตอนในการเตรียมแท่งตัวอย่างดังนี้

1. เตรียมวัสดุมวลดินใส่ในถาด โดยใช้ตัวอย่างดินแห้งประมาณ 4 กิโลกรัม ผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ตราช้าง ด้วยปริมาณ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของดิน

2. จากนั้น ผสมน้ำกับน้ำยางพารา ให้มีความเข้มข้นของยางพาราแตกต่างกัน 3 กรณี คือ ร้อยละ 5 ร้อยละ 7.5 และ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ จากนั้นนำน้ำที่ผสมกับน้ำยางพาราแล้วด้วยปริมาณที่ OMC มาผสมวัสดุในถาดผสม ทำการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และบ่มแท่งตัวอย่างเพื่อไม่ให้ความชื้นเปลี่ยนแปลง 7 วัน และ 28 วัน เช่นเดียวกับการเตรียมแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์

3.5 การทดสอบแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์

การทดสอบสมบัติของดินซีเมนต์ ประกอบด้วย การทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ และการทดสอบและ การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้าง (Unconfined Compression Test) ดังข้อที่ 3.5.1 และ 3.5.2 ตามลำดับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.5.1 การทดสอบค่า ซี.บี.อาร์

วิธีการทดสอบนี้เป็นการหาค่าเปรียบเทียบค่าความสามารถในการรับน้ำหนัก (Bearing Value) กับวัสดุหินมาตรฐาน เพื่อทดสอบวัสดุมวลรวมดิน เช่นเดียวกับการทดสอบสมบัติพื้นทางของวัสดุมวลรวมดิน ดังที่ได้แสดงในข้อที่ 3.2.5 โดยการเตรียมแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์ที่มีการบ่มไม่ให้ความชื้นเปลี่ยนแปลง 7 วัน และ 28 วัน

3.5.2 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้าง (Unconfined Compression Test)

นำตัวอย่างแท่งดินซีเมนต์ เข้าเครื่องกด โดยใช้อัตราการกด 0.05 นิ้วต่อนาที ในระหว่างการทดสอบ บันทึกขนาดน้ำหนักกด และค่าความสูงที่เปลี่ยนแปลง

วิเคราะห์ผลจากกราฟความเค้นและความเครียด (Stress-Strain Diagram) โดยการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด (Unconfined Compressive Strength; UCS) และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity; E) ระหว่างตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพกับดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และน้ำยางพารา และเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวง มาตรฐานที่ ทล.-ม.204/2553 มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base)

รูปที่ 3.9 แท่งตัวอย่างดินซีเมนต์สำหรับทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้าง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.10 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้าง (Unconfined Compression Test)

บทที่ 4
ผลการวิจัย

โครงการประยุกต์ใช้ยางพาราและดินซีเมนต์สำหรับงานก่อสร้างถนน เป็นการวิจัยทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมดิน (Soil Aggregate) การทดสอบเปรียบเทียบสมบัติของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา กับดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และดินซีเมนต์ที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ พร้อมทั้งเปรียบเทียบสมบัติของดินซีเมนต์กับมาตรฐานกรมทางหลวง โดยแสดงผลการวิจัย ในข้อที่ 4.1-4.5 ตามลำดับ ดังนี้

- ผลการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมดิน
- ผลการทดสอบดินซีเมนต์
- ผลการทดสอบดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยาโพลิเมอร์
- ผลการทดสอบดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา
- ผลการเปรียบเทียบสมบัติของดินซีเมนต์ กับดินซีเมนต์ปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และน้ำยางพารา

4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมดิน

ผลการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมดินประกอบด้วย การหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของดิน การหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน ทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์ และการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน ดังตารางที่ 4.1 พบว่า วัสดุมวลรวมดินนี้ไม่สามารถหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกได้ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 ความหนาแน่นสูงสุด 1.748 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาณความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด (OMC) เท่ากับร้อยละ 9.2 และค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 16 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่า ร้อยละ 25 จึงถือว่าวัสดุมวลรวมดินนี้ไม่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุรองพื้นทาง ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม.205/2532 มาตรฐานรองพื้นทางวัสดุมวลรวม

ดังนั้น วัสดุมวลรวมดินนี้ จึงเหมาะสมสำหรับผลิตอิฐดินซีเมนต์ ที่ต้องปรับปรุงคุณภาพให้มีสมบัติทางวิศวกรรมที่เหมาะสมสำหรับวัสดุโครงสร้างทาง

ตารางที่ 4.1 ผลทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมดิน

Engineering Property	Test Results
1. ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit; L.L)	Non Plastic
2. พิกัดพลาสติก (Plastic Limit; P.L.)	Non Plastic
3. ค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plastic Index ; P.I.)	Non Plastic
4. ค่าความถ่วงจำเพาะ	2.61
5. ปริมาณความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content; OMC)	9.2 %
6. ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density; λ_{dmax})	1.748 g/cm^3
7. % CBR	16

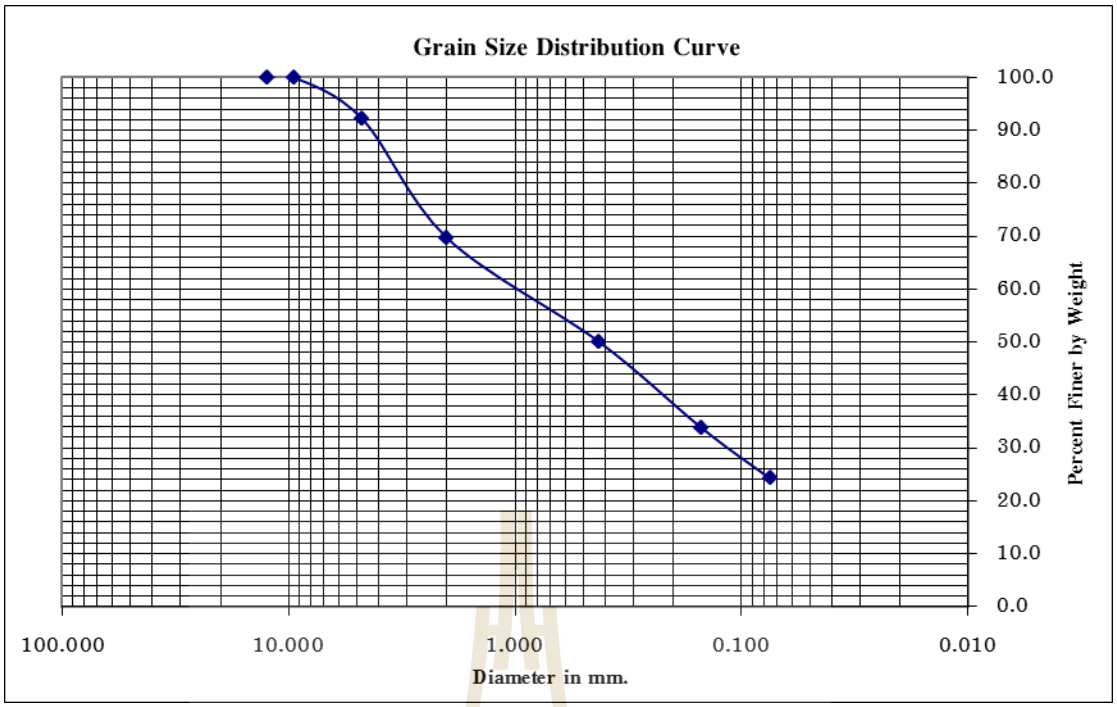
การแสดงผลการทดสอบการหาค่าการกระจายตัวของเม็ดดิน ดังตารางที่ 4.2 และแสดงกราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน ดังรูปที่ 4.1 พบว่า วัสดุมวลรวมนี้มีขนาดเม็ดโตที่สุดไม่เกิน 50 มิลลิเมตร มีส่วนที่ผ่านตระแกรงขนาด 2.00 มิลลิเมตร (เบอร์ 10) ร้อยละ 69.65 และมีส่วนที่ผ่านตระแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ร้อยละ 24.20

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบขนาดและความคละของวัสดุมวลรวมดินกับมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (มาตรฐานที่ ทล.-ม.204/2533) และมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (มาตรฐานที่ ทล.-ม. 206/2532) พบว่า มีขนาดเม็ดโตที่สุดไม่เกิน 50 มิลลิเมตร มีส่วนที่ผ่านตระแกรงขนาด 2.00 มิลลิเมตร (เบอร์ 10) ไม่เกิน ร้อยละ 70 และมีส่วนที่ผ่านตระแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่เกิน ร้อยละ 25 ดังนั้น วัสดุมวลรวมดินนี้ จึงเหมาะสมที่จะนำมาปรับคุณภาพให้มีสมบัติทางวิศวกรรมที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุพื้นทางดินซีเมนต์ ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ที่ ทล.-ม. 204/2533

ตารางที่ 4.2 ผลทดสอบขนาดความคละของวัสดุมวลรวมดิน

Sieve No.	เปอร์เซนต์ผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก
1/2"	100.00
3/8"	100.00
4	92.21
10	69.65
40	49.99
100	33.74
200	24.20

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.1 กราฟการกระจายขนาดของวัสดุมวลรวมดิน

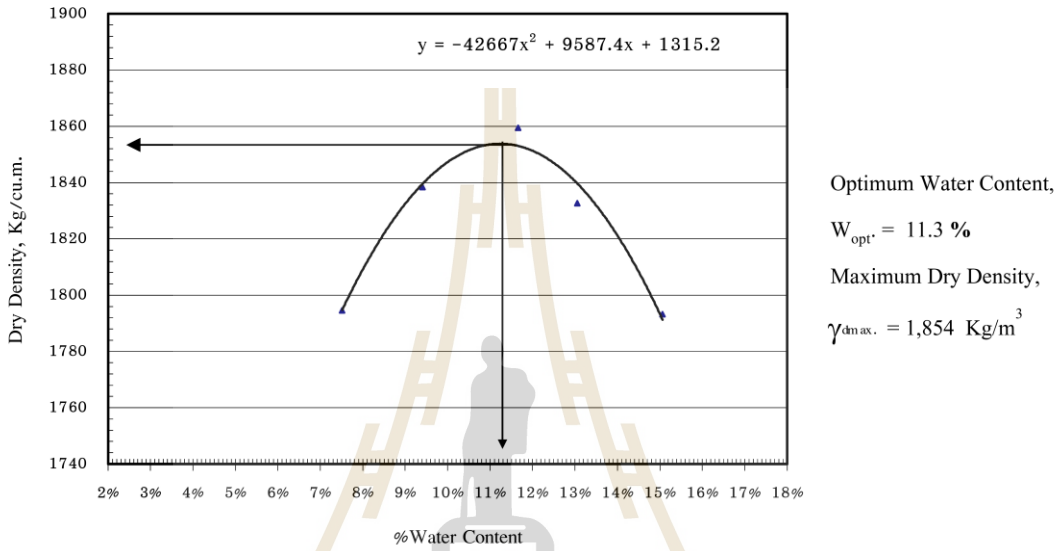
4.2 ผลการทดสอบดินซีเมนต์

การทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ โดยทดลองปรับปรุงคุณภาพวัสดุมวลรวมด้วนปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 โดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์แตกต่างกัน 3 กรณี คือ ร้อยละ 2.5 ร้อยละ 5 และร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมดิน ในเบื้องต้นทำการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เพื่อหาปริมาณความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content) และการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางวิศวกรรมด้วยการทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์ เพื่อหาค่าความสามารถในการรับน้ำหนัก การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้าง (Unconfined Compression Test) เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength; UCS) และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity; E)

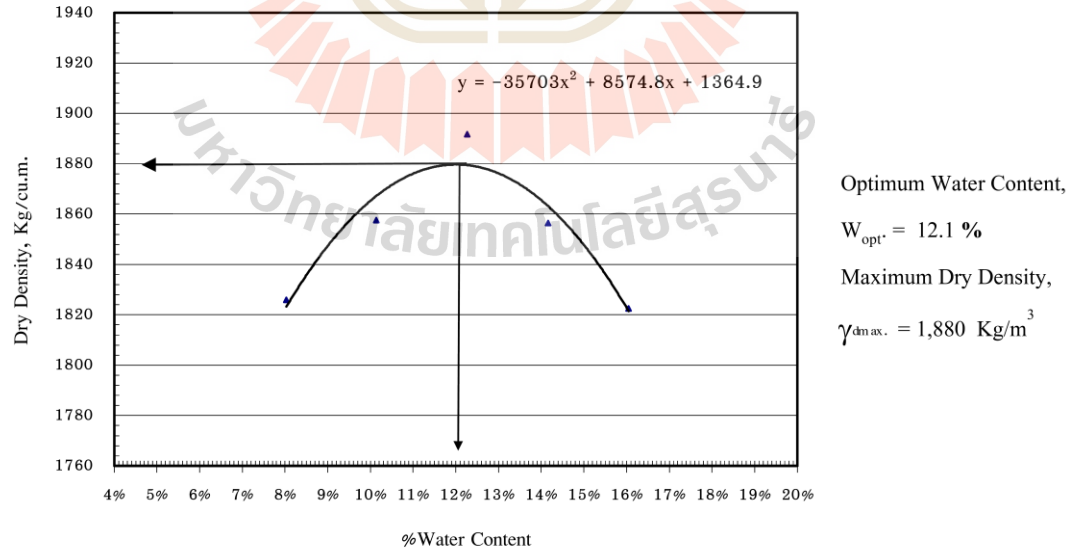
การแสดงผลการทดสอบสมบัติของดินซีเมนต์ ประกอบด้วย การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานและผลการทดสอบ ซี.บี.อาร์ และผลการทดสอบแรงอัด ดังแสดงในข้อที่ 4.2.1.-4.2.3 ตามลำดับ

4.2.1 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินซีเมนต์

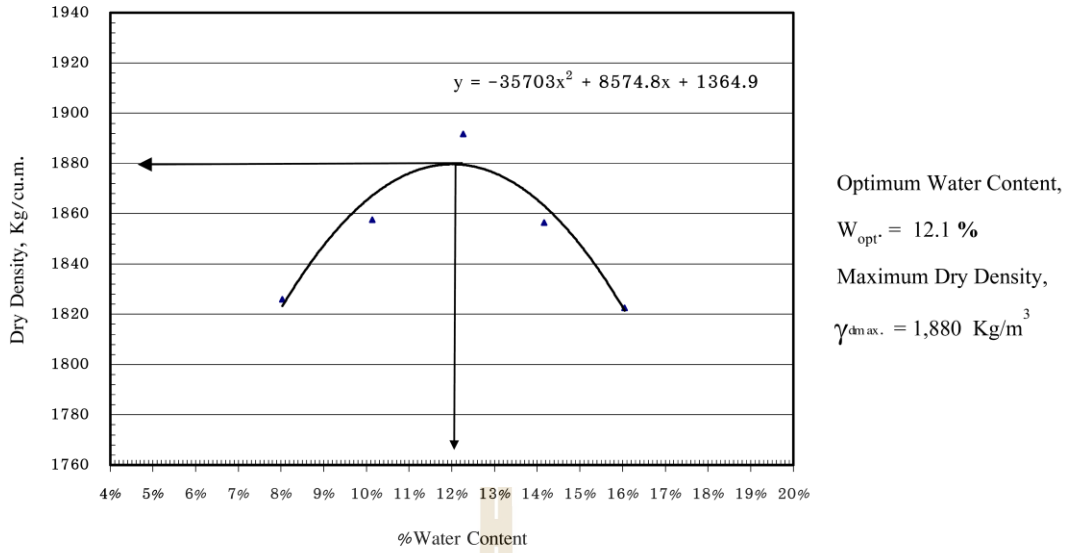
ผลทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุมวลรวมดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ร้อยละ 2.5 ร้อยละ 5 และ ร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมดิน ดังแสดงในรูปที่ 4.2-4.4 ตามลำดับ เพื่อหาปริมาณความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content; OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density; λ_{dmax}) ซึ่งแสดงสรุปผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ร้อยละ 2.5



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ร้อยละ 5



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ร้อยละ 7.5

ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินซีเมนต์

Cement (wt.%)	ปริมาณความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content; OMC) **(%)**	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density; λ_{dmax}) **(g/cm²)**
2.5	11.3	1.854
5	12.1	1.880
7.5	13.1	1.860

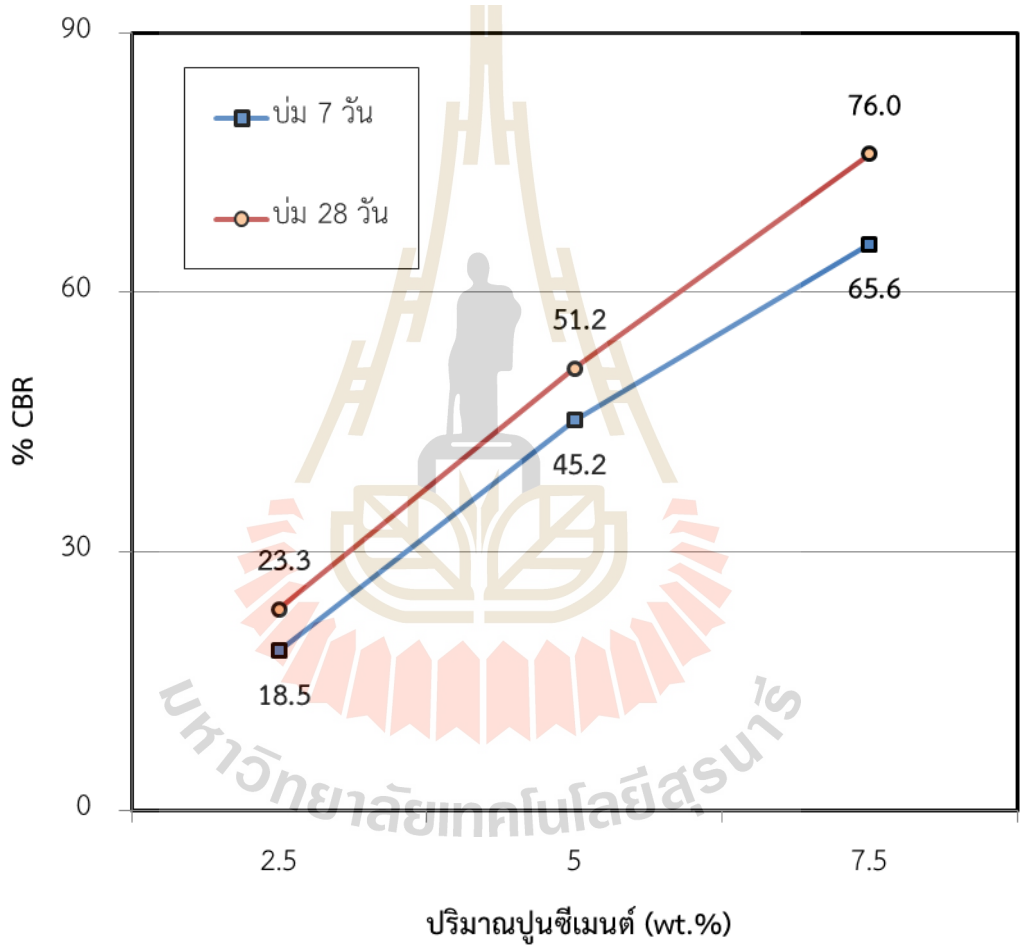
จากตารางที่ 4.3 แสดงผลทดสอบสมบัติ พบว่า วัสดุมวลรวมดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมดิน มีปริมาณความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสูด ร้อยละ 11.3 และมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด 1.854 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร วัสดุมวลรวมดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมดิน มีปริมาณความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสูด ร้อยละ 12.1 และมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด 1.880 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนวัสดุมวลรวมดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมดิน มีปริมาณความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสูด ร้อยละ 12.1 และมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด 1.880 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ทั้งนี้ ปริมาณความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุดของวัสดุมวลรวมดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ร้อยละ 2.5 ร้อยละ 5 และร้อยละ 7.5 นี้ จะหมายถึงปริมาณน้ำที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์ในการทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์ และการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้าง (Unconfined

Compression Test) เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด (Unconfined Compressive Strength; UCS) และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity; E) ของดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารผสมเพิ่มแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

4.2.2 ผลการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์

การแสดงผลการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์ ด้วยแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด กับปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ดังรูปที่ 4.5



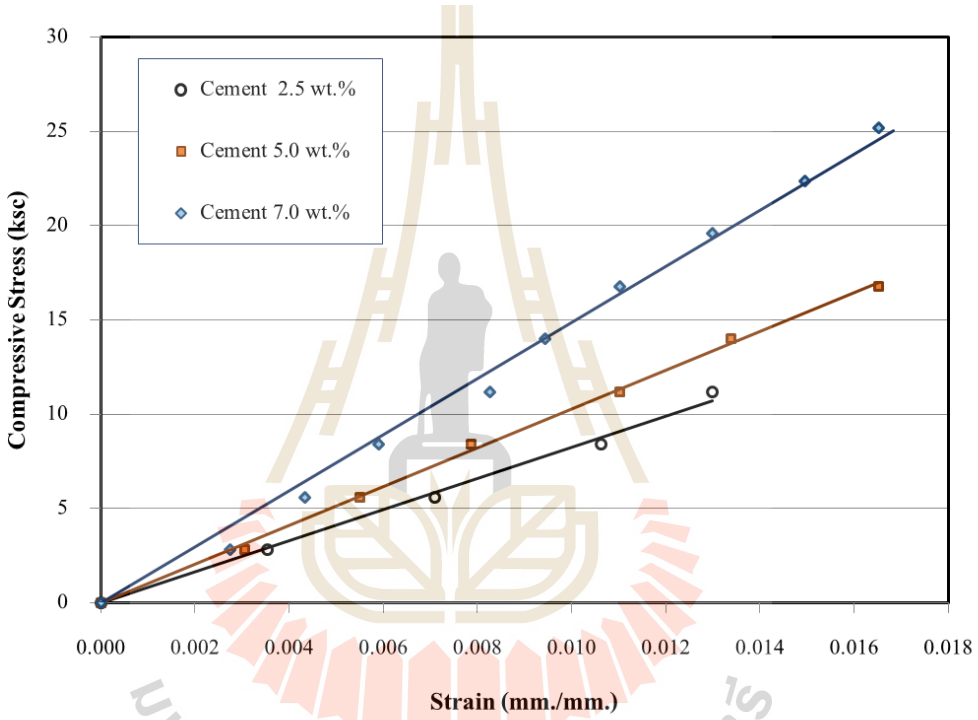
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ ของวัสดุมวลรวมดิน ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ ของวัสดุมวลรวมดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 พบว่า ที่อายุการบ่ม 7 วัน วัสดุมวลรวมดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 2.5 ร้อยละ 5 และร้อยละ 7.5 มีค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด ร้อยละ 18.5 ร้อยละ 45.2 และ 65.6 ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อเพิ่มอายุการบ่มดินซีเมนต์

จาก 7 วัน เป็น 28 วัน พบว่า ค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดย วัสดุมวลรวมดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 2.5 ร้อยละ 5 และร้อยละ 7.5 มีค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด คือ ร้อยละ 23.3 ร้อยละ 51.1 และร้อยละ 76.0 ตามลำดับ

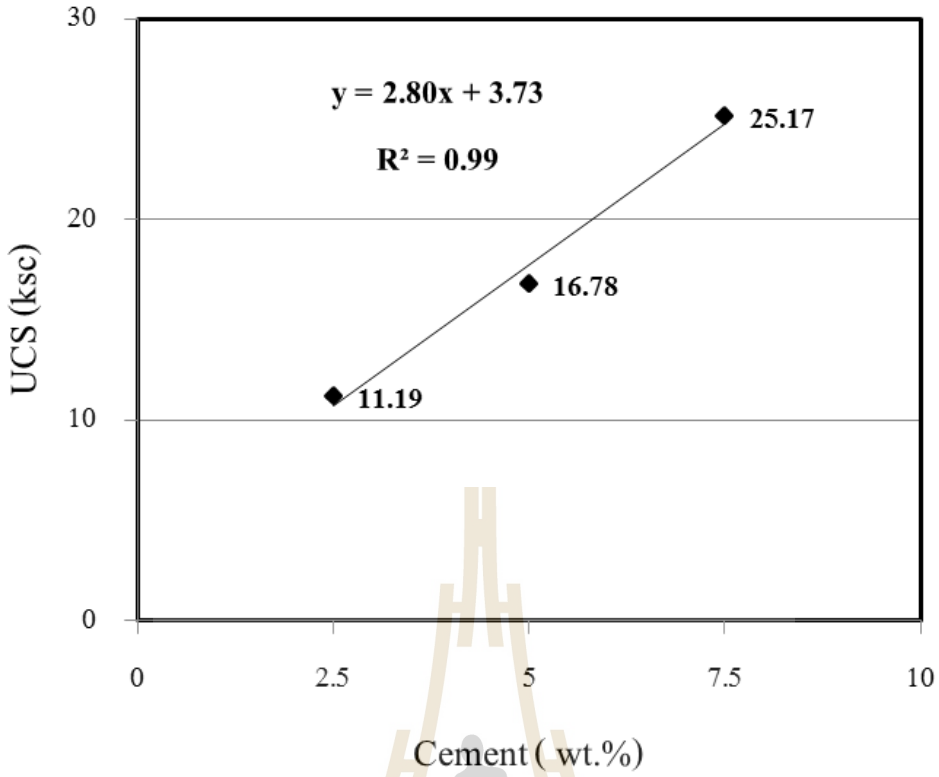
4.2.3 ผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้างของดินซีเมนต์

แสดงผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้าง (Unconfined Compression Test) ของวัสดุมวลรวมดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ร้อยละ 2.5 ร้อยละ 5 และร้อยละ 7.5 ที่อายุการบ่ม 7 วัน ด้วยกราฟความเค้นและความเครียด ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุมวลรวมดินปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

จากรูปที่ 4.6 แสดงกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุมวลรวมดินปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์กับปริมาณปูนซีเมนต์

จากรูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์กับปริมาณปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ พบว่า วัสดุมวลรวมดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 2.5 และ 5.0 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมดิน มีค่ากำลังรับแรงอัด 11.19 และ 16.78 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ ส่วนวัสดุมวลรวมดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมดิน มีค่ากำลังรับแรงอัด 25.17 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่า 17.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตรตามมาตฐานพื้นทางดินซีเมนต์

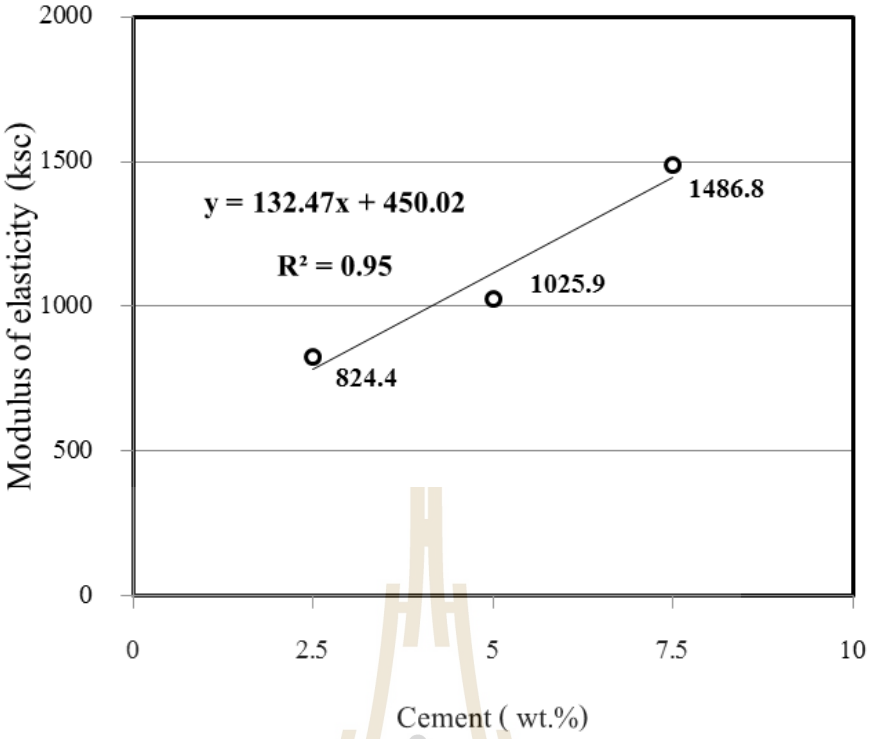
นอกจากนี้ พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์แปรผันตรงกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ และมีความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังสมการที่ 4.1 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) เท่ากับ 0.99

$$UTS = 2.80x+3.73 \quad ; \quad R^2=0.99 \qquad (4.1)$$

โดยที่

UTS คือ ค่ากำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

x คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุมวลรวมดิน



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของของดินซีเมนต์กับปริมาณปูนซีเมนต์

จากรูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของของดินซีเมนต์กับปริมาณปูนซีเมนต์ พบว่า ที่อายุการบ่ม 7 วัน วัสดุมวลรวมดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 2.5 ร้อยละ 7.5 และ ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมดิน มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น คือ 824.4 1,025.9 และ 1,486.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ทั้งนี้ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ ดังสมการที่ 4.2 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) เท่ากับ 0.95

$$E = 132.47x+450.02 \quad ; \quad R^2=0.95 \qquad (4.2)$$

โดยที่

E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

x คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุมวลรวมดิน (ร้อยละ โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมดิน)

ทั้งนี้ จากการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้าง เป็นข้อพิจารณาเลือกวัสดุมวลรวมดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมดิน ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีค่ากำลังรับแรงอัด 16.78 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับการทดลองปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์ด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และน้ำยางพารา เพื่อเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ให้เป็นไปตามมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ คือ ที่อายุการบ่ม 7 วัน ต้องมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 17.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบแต่ไม่น้อยกว่า 17.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้ปริมาณความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด คือ ร้อยละ 12.1 และมีค่าความหนาแน่นแห้ง สูงสุด1.880 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

4.3 ผลการทดสอบดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยาโพลิเมอร์

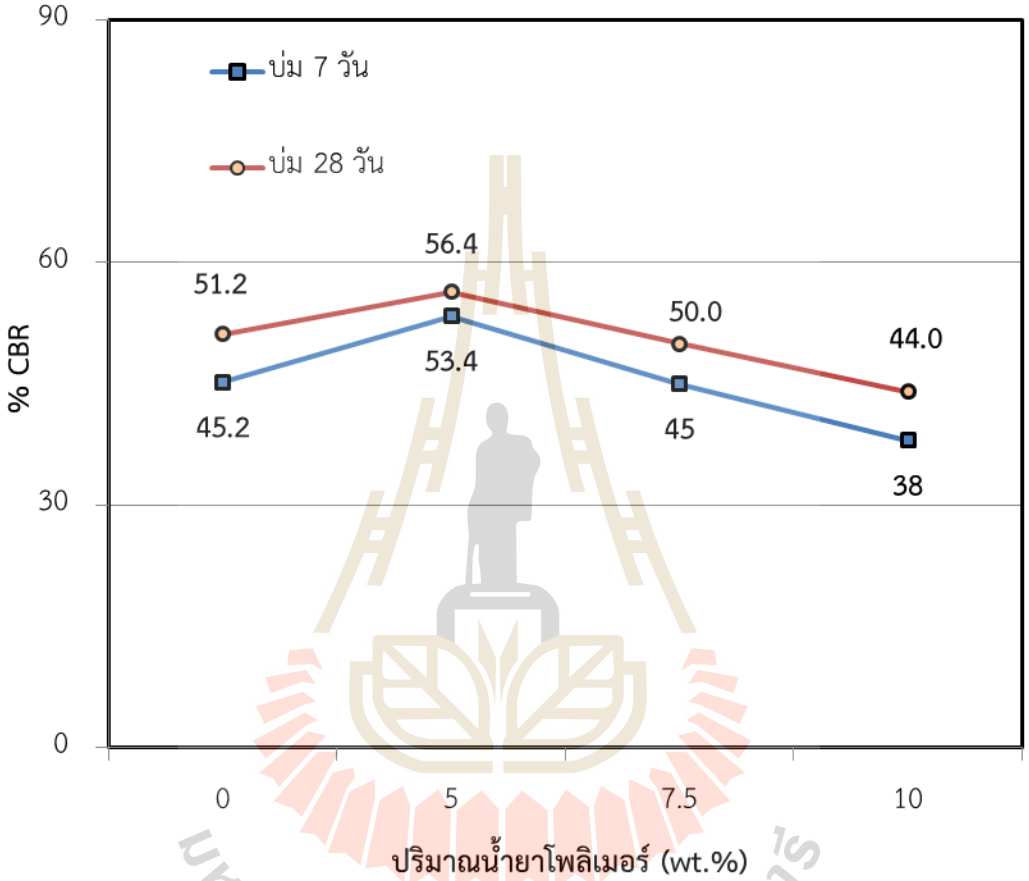
การปรับปรุงคุณภาพดีซีเมนต์ด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ โดยใช้วัสดุมวลรวมดินปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมดิน ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด ร้อยละ 12.1 ทั้งนี้ และมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด 1.880 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เงื่อนไขที่ทดสอบปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ แตกต่างกัน 3 กรณี คือ ร้อยละ 5 ร้อยละ 7.5 และร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำที่เป็นส่วนผสม

การทดสอบสมบัติของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลเมอร์ ประกอบด้วย การทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ เพื่อหาค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของดินซีเมนต์ และการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้าง เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัด และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น โดยแสดงรายละเอียดของผลการทดสอบ ในข้อที่ 4.3.1-4.3.2 ตามลำดับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.3.1 ผลการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์

การแสดงผลการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเอมร์ด้วยแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด กับปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์

จากรูปที่ 4.9 แสดง ผลทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน พบว่า ที่อายุการบ่ม 7 วัน ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ ร้อยละ 5 ร้อยละ 7.5 และร้อยละ 10 มีค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 53.4 ร้อยละ 45 และ ร้อยละ 38 ตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ ซึ่งมีค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัด ร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 45.2 แล้วพบว่าการปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์ด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำ เป็นกรณีเดียวที่ ค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุดเพิ่มขึ้น ส่วน

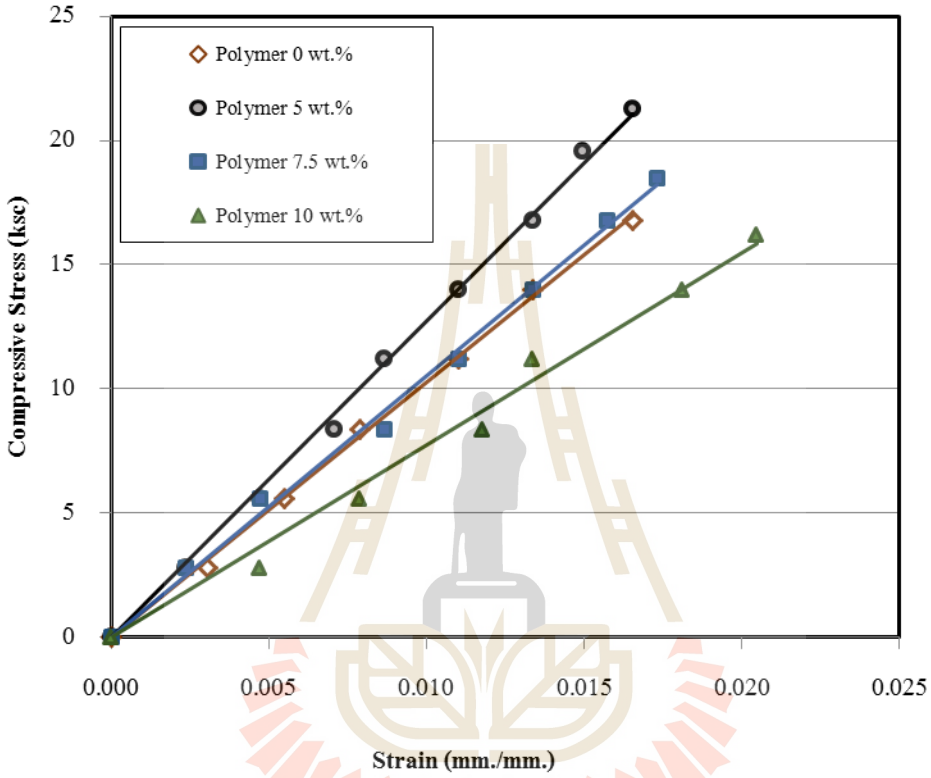
การปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ร้อยละ 7.5 และ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ ทำให้ ค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ที่ยังไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์

ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ ร้อยละ 5 ร้อยละ 7.5 และร้อยละ 10 มีค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 56.4 ร้อยละ 50.0 และ ร้อยละ 44 ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ไม่ปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งมีค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 51.2 แล้วพบว่า การปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์ด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ร้อยละ 7.5 และร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ มีค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด น้อยกว่าดินซีเมนต์ที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ ส่วนกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์ด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำ เป็นกรณีเดียวที่มีค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด เพิ่มขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

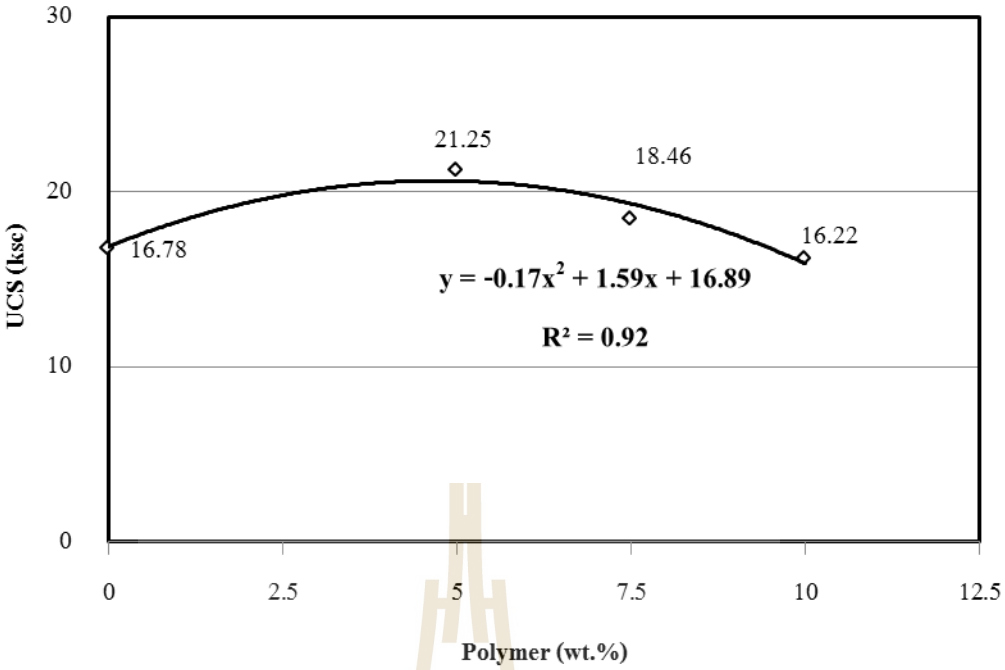
4.3.2 ผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้างของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์

การแสดงผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้างของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน ด้วยกราฟความเค้น - ความเครียดของดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟความเค้น-ความเครียดของดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์

จากรูปที่ 4.10 แสดงกราฟความเค้นความเครียดของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ ดังรูปที่ 4.1 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น กับปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์

จากรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ กับปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ พบว่า ที่อายุการบ่ม 7 วัน ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ ร้อยละ 5 และ ร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนักของน้ำ มีค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 21.25 และ 18.46 กิโลกรับต่อตารางเซนติเมตร ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 16.78 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แล้วพบว่า ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ มีค่ากำลังรับแรงลดลง ส่วนการปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ด้วยน้ำยาโพลเมอร์ร้อยละ 5 และ ร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนักของน้ำ มีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของซีเมนต์กับมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ ที่กำหนดให้ค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่าเท่ากับ 17.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบว่า ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ ร้อยละ 5 และ ร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนักของน้ำ มีค่ากำลังอัดมากกว่า 17.5 กิโลกรัมต่อตารางเซินติเมตรตามมาตฐานพื้นทางดินซีเมนต์ ส่วนการปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ ทั้งนี้ การปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำ เป็นตัวอย่างที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดในกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ด้วยน้ำยาโพลิเมอร์

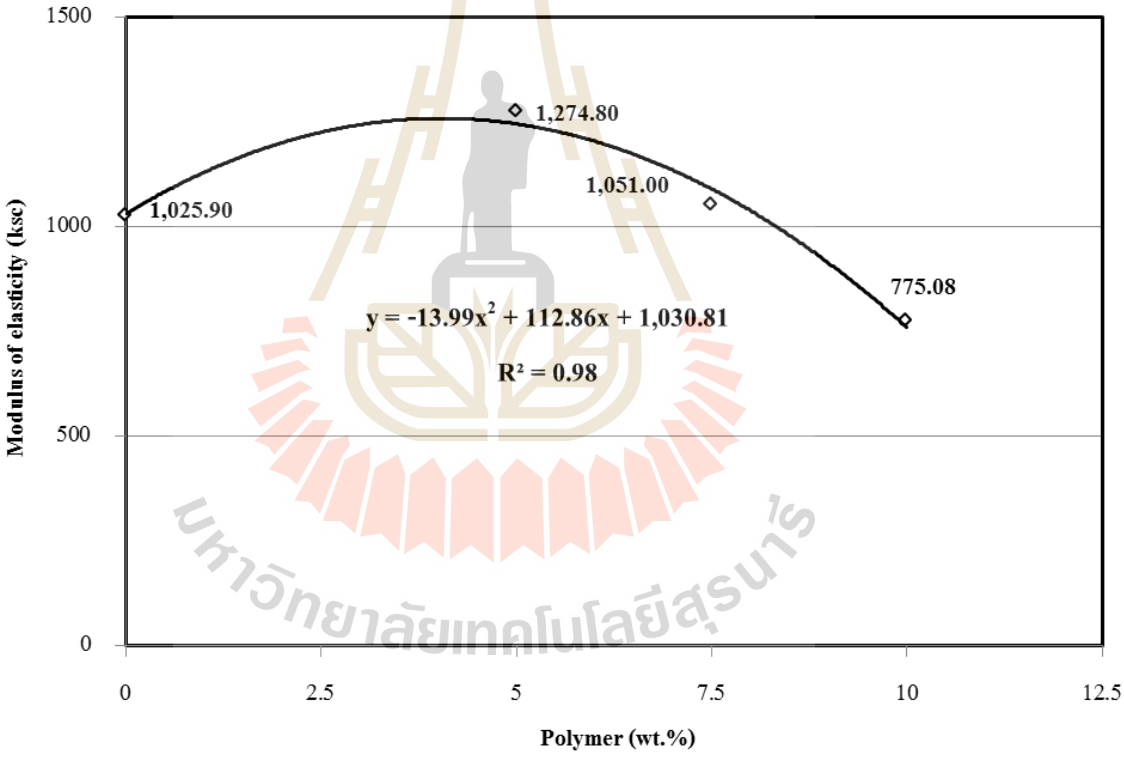
จากรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ กับปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ มีความสัมพันธ์กับปริมาณปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพแบบโมลิโนเมียลกำลังสอง ดังสมการที่ 4.3 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) เท่ากับ 0.92

$$UCS = -0.17x^2+1.59x+16.89 \quad ; \quad R^2=0.92 \quad (4.3)$$

โดยที่

UCS คือ ค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

x คือ ปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำ)



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นกับปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์

จากรูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์ กับปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ พบว่า การปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ร้อยละ 5 และร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนักของน้ำ มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น เท่ากับ 1274.80 และ 1051.00 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์ที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น เท่ากับ 1025.90 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์ในการปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์เป็น ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ ทำให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์ลดลง เหลือ 775.08 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

นอกจากนี้ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์ กับปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ มีความสัมพันธ์แบบโมลิโนเมียลกำลังสอง ดังสมการที่ 4.4 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) เท่ากับ 0.98

$$E = -13.99x^2+112.86x+1,030.81 \quad ; \quad R^2=0.98 \qquad (4.4)$$

โดยที่

E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

x คือ ปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำ)

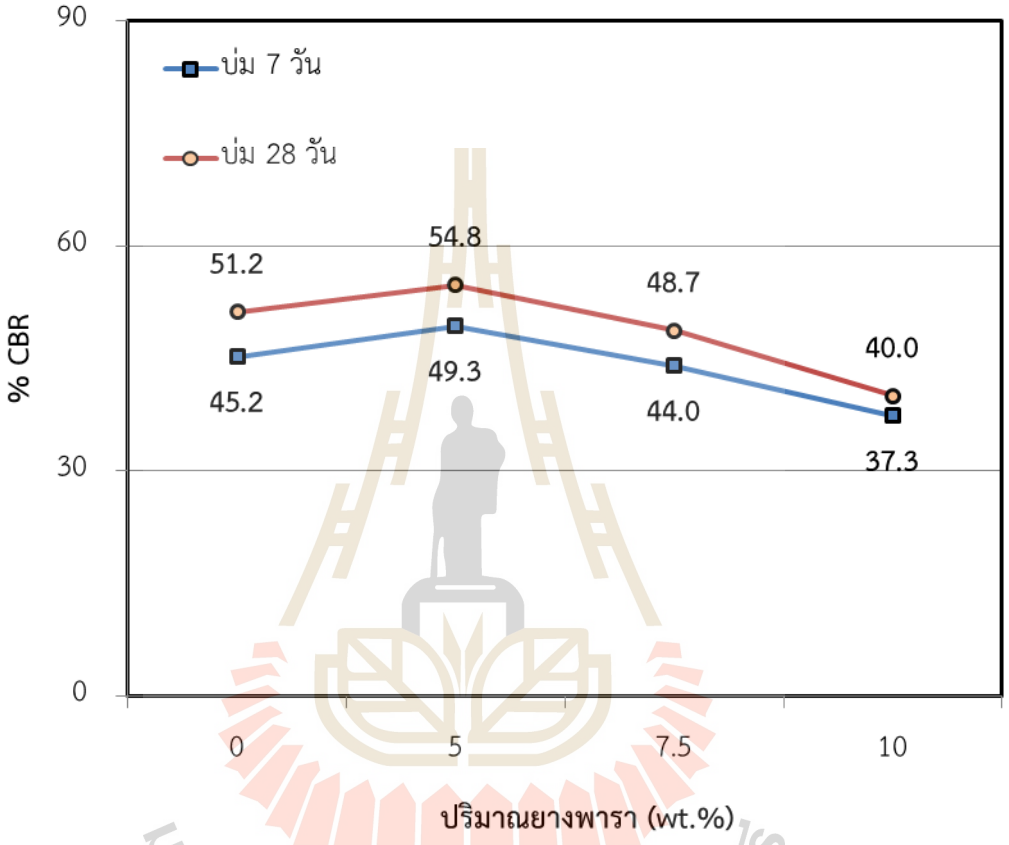
4.4 ผลการทดสอบดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา

การปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ด้วยน้ำยางพารา โดยเตรียมตัวอย่างจากวัสดุมวลรวมดินปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมดิน ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด ร้อยละ 12.1 และมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด 1.880 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เงื่อนไขในการทดลองปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา ด้วยปริมาณที่แตกต่างกัน 3 กรณี คือ ร้อยละ 5 ร้อยละ 7.5 และร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำที่เป็นส่วนผสม

การเปรียบเทียบสมบัติของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา กับดินซีเมนต์ที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ และการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้าง ดังแสดงในข้อที่ 4.4.1-4.4.2

4.4.1 ผลการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา

แสดงผลการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา ด้วยแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด กับปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ดังรูปที่ 4.13



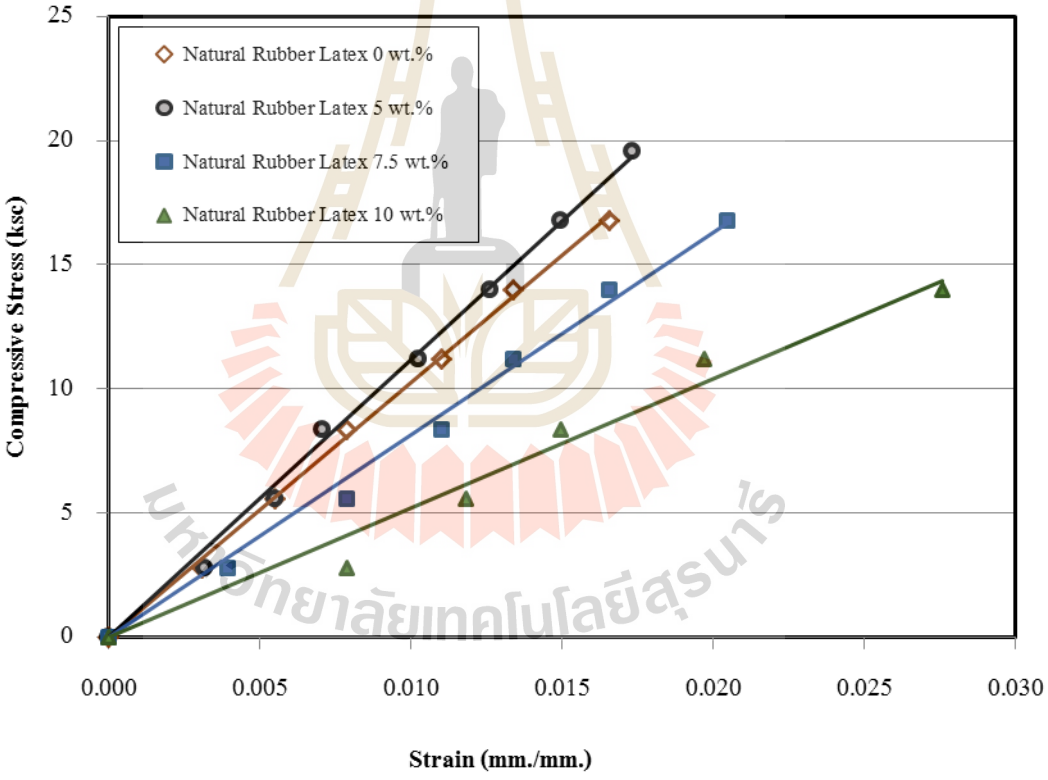
รูปที่ 4.13 ผลทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา

จากรูปที่ 4.13 แสดงผลทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพาราที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน พบว่า ที่อายุการบ่ม 7 วัน ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา ร้อยละ 5 ร้อยละ 7.5 และร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ มีค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 49.3 ร้อยละ 44 และร้อยละ 37.3 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งมีค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 45.2 แล้วพบว่า การปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ด้วยน้ำยางพาราร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำ ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของดินซีเมนต์ โดยค่า ซี.บี.อาร์ เพิ่มขึ้น

ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา ร้อยละ 5 ร้อยละ 7.5 และร้อยละ 10 มีค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัดร้อยละ 95 ที่ความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 54.8 ร้อยละ 48.7 และร้อยละ 40.0 ตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา ซึ่งมีค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 51.2 แล้วพบว่า การปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์ด้วยน้ำยางพาราร้อยละ 5 สามารถเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของดินซีเมนต์

4.4.2 ผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้างของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา

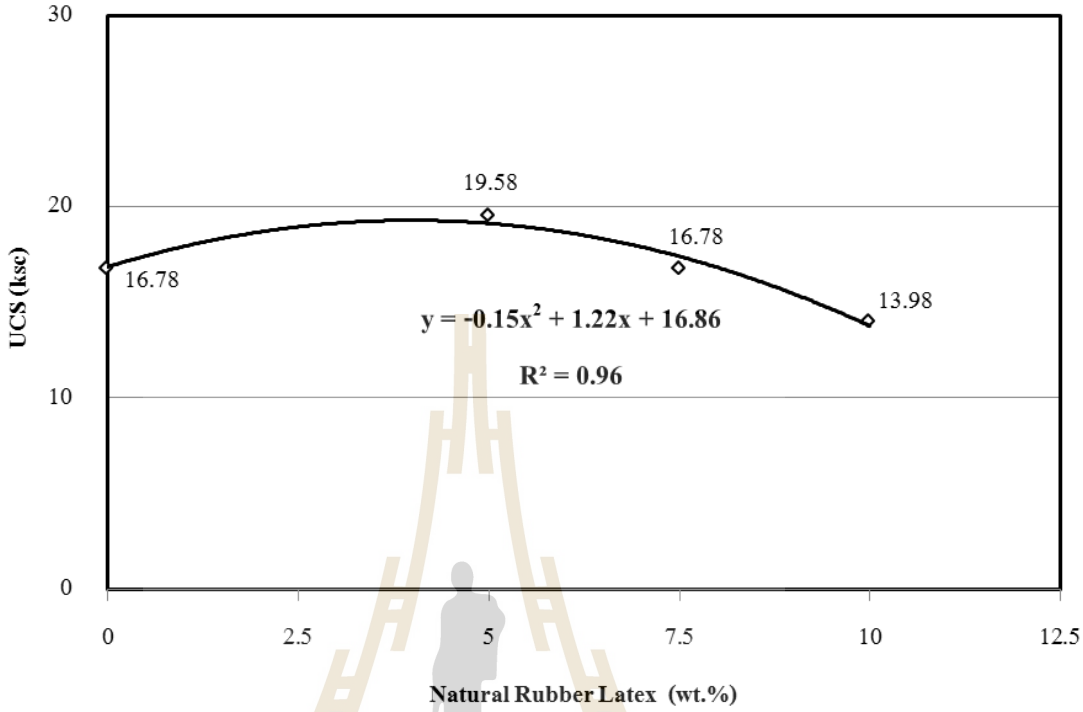
การแสดงผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้างของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา ที่อายุการบ่ม 7 วัน ด้วยกราฟความเค้น-ความเครียด ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟความเค้น-ความเครียดของดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา

จากรูปที่ 4.14 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา ซึ่งสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด กับปริมาณน้ำยางพาราที่ใช้

ในการปรับปรุงคุณภาพ ดังรูปที่ 4.15 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นกับปริมาณน้ำยางพาราที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์กับปริมาณน้ำยางพารา

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ กับปริมาณน้ำยางพาราที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ พบว่า ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา ร้อยละ 5 ร้อยละ 7.5 และร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ มีค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 19.58 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร 16.78 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ 13.98 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 16.78 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แล้วพบว่า ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำ มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ส่วนดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา ร้อยละ 7.5 และ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ มีค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของซีเมนต์กับมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ ที่กำหนดให้ค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่าเท่ากับ 17.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบว่า ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพน้ำยางพาราร้อยละ 5 มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า ค่าตามมาตฐานพื้นทางดินซีเมนต์กำหนดไว้

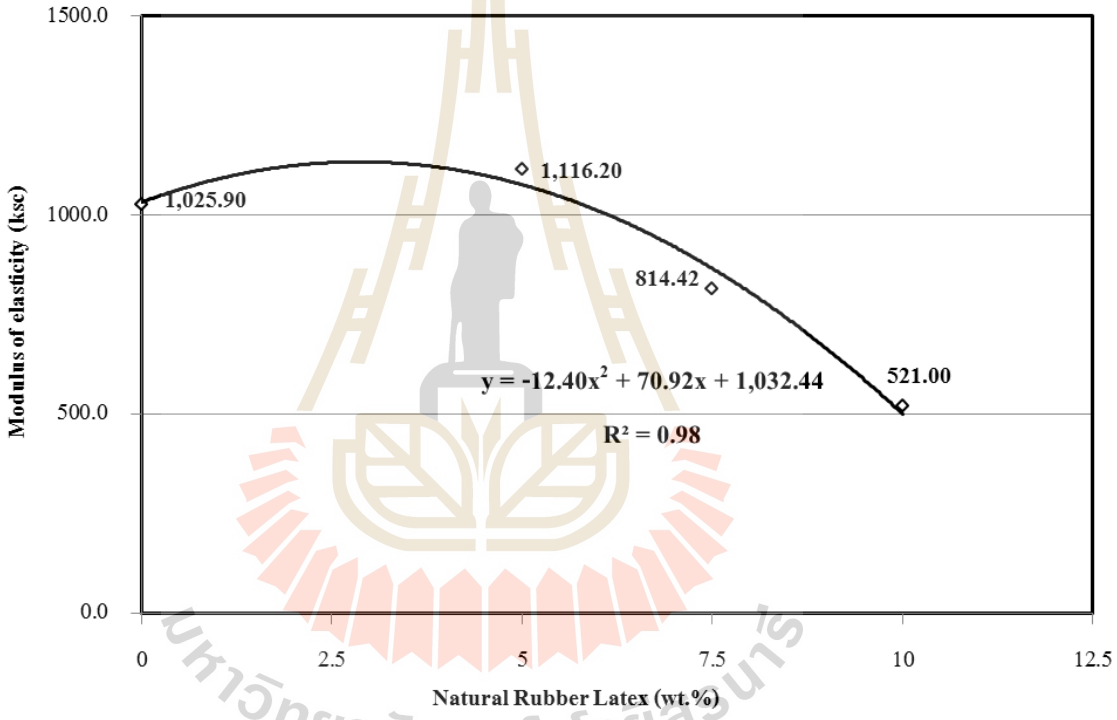
จากรูปที่ 4.15 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์กับปริมาณน้ำยางพาราที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ มีความสัมพันธ์แบบโมลิโนเมียลกำลังสอง ดังสมการที่ 4.5 โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.96

$$UCS = -0.15x^2+1.22x+16.86 \quad ; \quad R^2=0.96 \quad (4.5)$$

โดยที่

UCS คือ ค่ากำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

x คือ ปริมาณน้ำยางพารา (ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำ)



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์กับปริมาณน้ำยางพารา

จากรูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์กับประมาณน้ำยางพาราที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ พบว่า การปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ด้วยน้ำยางพารา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำ เป็นกรณีที่มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่าดินซีเมนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ทั้งนี้ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัลความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์ กับปริมาณน้ำยางพาราที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ มีความสัมพันธ์แบบโมลิโนเมียลกำลังสอง ดังสมการที่ 4.6 มีค่า R^2 เท่ากับ 0.98

$$E = -13.40x^2+70.92x+1,032.44 \quad ; \quad R^2=0.98 \quad (4.6)$$

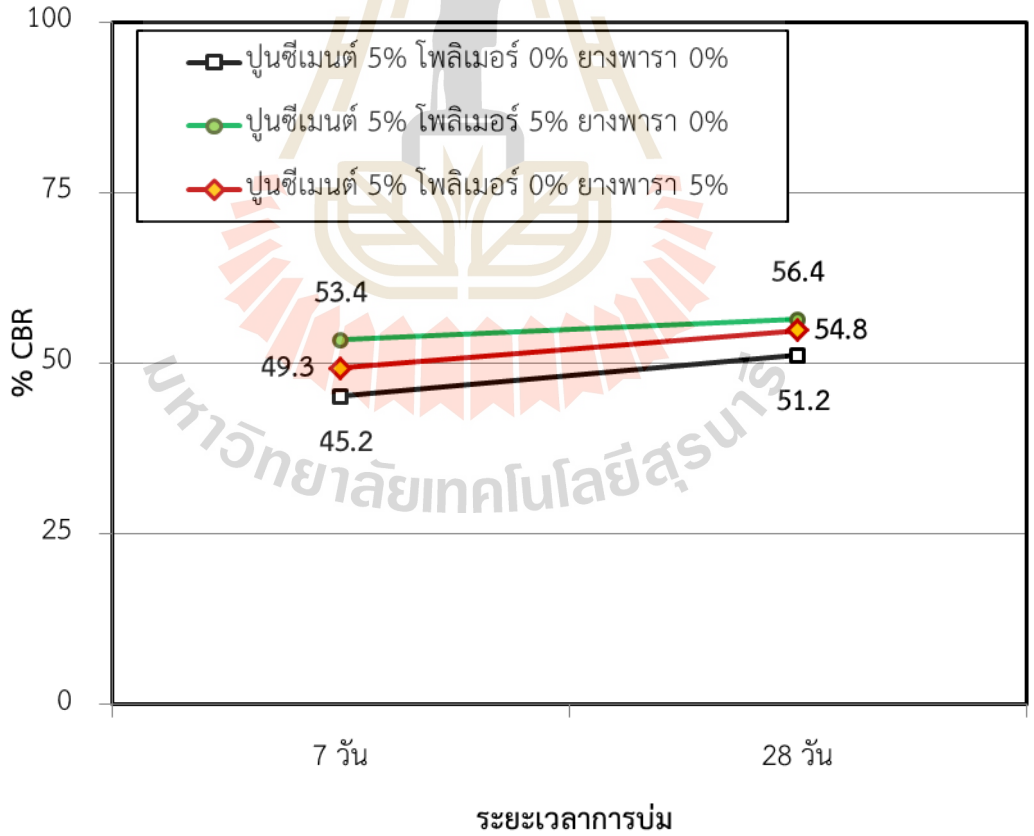
โดยที่

E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

x คือ ปริมาณน้ำยางพารา (ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำ)

4.5 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และน้ำยางพารา

จากผลการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ และการทดสอบแรงอัดแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้างของดินซีเมนต์ ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา พบว่า เงื่อนการปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ด้วยน้ำยางพาราและน้ำยาโพลิเมอร์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำ เป็นผลดีต่อสมบัติของดินซีเมนต์ คือ ช่วยเพิ่มค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด เพิ่มค่ากำลังรับแรงอัด และเพิ่มค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ดังรูปที่ 4.17 - 4.19 ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบผลทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ ดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ

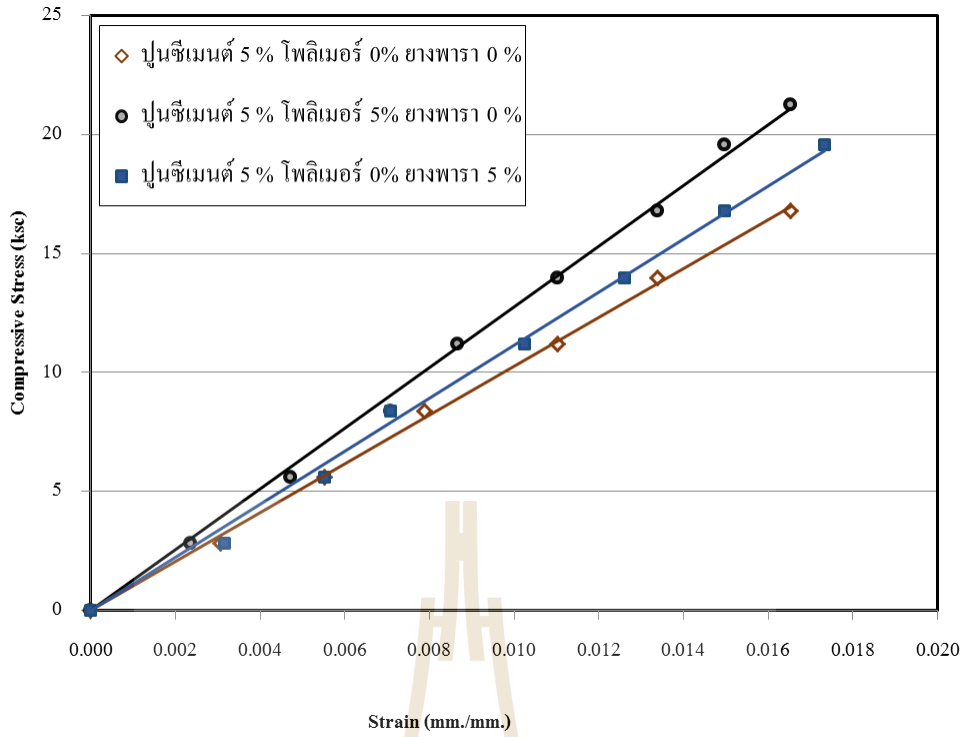
จากรูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบผลทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ พบว่า การปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ด้วยน้ำยางพาราทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ทั้งในกรณีที่บ่ม 7 วัน และ 28 วัน โดยกรณีที่ระยะการบ่ม 7 วัน พบว่า ที่อายุการบ่ม 7 วัน ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และน้ำยางพารา มีค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัด ร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด มากกว่า ดินซีเมนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ร้อยละ 18.14 และ 9.07 ตามลำดับ ส่วนที่อายุการบ่ม 28 วัน ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และน้ำยางพารา มีค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นของการบดอัด ร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด มากกว่า ดินซีเมนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ร้อยละ 10.16 และ 7.03 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์ กับดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ

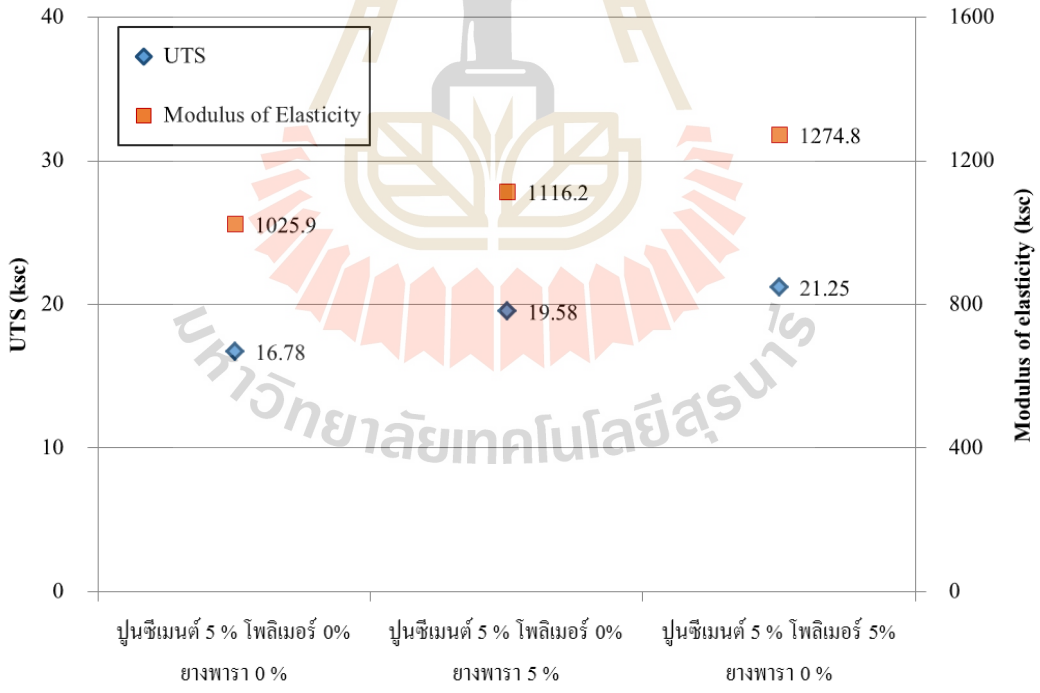
ตัวอย่าง	**ค่า ซี.บี.อาร์ ที่ความหนาแน่นการบดอัด ร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด (ร้อยละ)**		**เปรียบเทียบกับค่า ซี.บี.อาร์ ของดินซีเมนต์ (ร้อยละ)**	
	บ่ม 7 วัน	**บ่ม 28 วัน**	**บ่ม 7 วัน**	**บ่ม 28 วัน**
ปูนซีเมนต์ 5% โพลิเมอร์ 0% ยางพารา 0%	45.2	51.2	-	-
ปูนซีเมนต์ 5% โพลิเมอร์ 5% ยางพารา 0%	53.4	56.4	18.14	10.16
ปูนซีเมนต์ 5% โพลิเมอร์ 0% ยางพารา 5%	49.3	54.8	9.07	7.03

แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้าง ของดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยด้วยกราฟความเค้น-ความเครียด ดังรูปที่ 4.18 ค่ากำลังรับแรงอัด และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ดังรูปที่ 4.19

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบความเค้น-ความเครียดของดินซีเมนต์ กับดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบค่ากำลังรังแรงอัด และโมดูลัสความยืดหยุ่น ของดินซีเมนต์กับดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ

จากรูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัด และโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์ กับดินซีเมนต์ที่ปรังปรุงคุณภาพ พบว่า ทั้งค่ากำลังรับแรงอัด และโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา มีค่ามากกว่าดินซีเมนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ แต่น้อยกว่าดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์

โดยดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา มีค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 21.25 และ 19.58 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าดินซีเมนต์ที่มีค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 16.78 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ร้อยละ 26.67 และ 16.67 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ กับดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ

ตัวอย่าง	ค่ากำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	เปรียบเทียบค่ากำลังอัดกับดินซีเมนต์ (ร้อยละ)
ปูนซีเมนต์ 5% โพลิเมอร์ 0% ยางพารา 0%	16.78	-
ปูนซีเมนต์ 5% โพลิเมอร์ 5% ยางพารา 0%	19.58	16.67
ปูนซีเมนต์ 5% โพลิเมอร์ 0% ยางพารา 5%	21.25	26.67

ส่วนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และน้ำยางพารา มีค่าเท่ากับ 1,278.8 และ 1,116.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ มีค่ามากกว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,025.9 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ร้อยละ 24.26 และ ร้อยละ 8.80 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์ กับดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ

ตัวอย่าง	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (ksc)	เปรียบเทียบค่ามูลัสความยืดหยุ่นกับดินซีเมนต์ (ร้อยละ)
ปูนซีเมนต์ 5% โพลิเมอร์ 0% ยางพารา 0%	1,025.9	-
ปูนซีเมนต์ 5% โพลิเมอร์ 5% ยางพารา 0%	1,116.2	8.80
ปูนซีเมนต์ 5% โพลิเมอร์ 0% ยางพารา 5%	1,274.8	24.26

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย

โครงการประยุกต์ใช้ยางพาราและดินซีเมนต์สำหรับงานก่อสร้างถนน มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัด และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และน้ำยางพารา เปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ จากผลการทดสอบสมบัติปฏิบัติการ สามารถสรุปผลการวิจัย ประกอบด้วย ผลการทดสอบสมบัติของวัสดุมวลรวมดิน ผลการทดสอบสมบัติของดินซีเมนต์ ดังนี้

5.1 สรุปผลทดสอบสมบัติของวัสดุมวลรวมดิน

1. ผลการทดสอบสมบัติของวัสดุมวลรวมดิน ซึ่งเป็นวัสดุหลักในการเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์ พบว่า ไม่สามารถหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกได้ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 ความหนาแน่นสูงสุด 1.748 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาณความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด (OMC) เท่ากับร้อยละ 9.2 และค่า CBR ที่ความหนาแน่นของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 16 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่า ร้อยละ 25 จึงถือว่าวัสดุมวลรวมดินนี้ไม่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุรองพื้นทาง ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม.205/2532 มาตรฐานรองพื้นทางวัสดุมวลรวม ดังนั้น วัสดุมวลรวมดินนี้ จึงเหมาะสมสำหรับผลิตอิฐดินซีเมนต์ ที่ต้องปรับปรุงคุณภาพให้มีสมบัติทางวิศวกรรมที่เหมาะสมสำหรับวัสดุโครงสร้างทาง

2. ผลการสอบทดขนาดและความคละของวัสดุมวลรวมดินกับมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (มาตรฐานที่ ทล.-ม.204/2533) และมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (มาตรฐานที่ ทล.-ม.206/2532) พบว่า มีขนาดเม็ดโตที่สุดไม่เกิน 50 มิลลิเมตร มีส่วนที่ผ่านตระแกรงขนาด 2.00 มิลลิเมตร (เบอร์ 10) ไม่เกิน ร้อยละ 70 และมีส่วนที่ผ่านตระแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่เกิน ร้อยละ 25 ดังนั้น วัสดุมวลรวมดินนี้ จึงเหมาะสมที่จะนำมาปรับคุณภาพให้มีสมบัติทางวิศวกรรมที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุพื้นทางดินซีเมนต์ ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ที่ ทล.-ม.204/2533

5.2 สรุปผลทดสอบสมบัติของดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ

การทดสอบสมบัติของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และน้ำยางพารา เปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ที่เตรียมตัวอย่างโดยใช้วัสดุมวลรวมดิน ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมดิน จากนั้นปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์ด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และน้ำยางพารา ร้อยละ 5 ร้อยละ 7.5 และ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ พบว่า การปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และน้ำยางพารา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำ เป็นกรณีที่มีค่า CBR ที่ความหนาแน่นของการบดอัด ร้อยละ 95 ของความ

หนาสูงสุด ค่ากำลังรับแรงอัด และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น สูงกว่าเงื่อนไขอื่น จึงใช้เป็นกรณีศึกษาเพื่อเปรียบเทียบสมบัติของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ และดินซีเมนต์ที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ สามารถสรุปผลวิจัย ได้ดังนี้

1. ผลทดสอบค่า ซี บี อาร์ ของดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ พบว่า ที่อายุการบ่ม 7 วัน ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ มีค่า CBR ที่ความหนาแน่นของการบดอัด ร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด ร้อยละ 53.4 ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา มีค่า CBR ที่ความหนาแน่นของการบดอัด ร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด ร้อยละ 49.3 ซึ่งมากกว่า ดินซีเมนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ร้อยละ 9.07 และ 18.17 ตามลำดับ

2. ผลทดสอบค่า ซี บี อาร์ ของดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ พบว่า ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และน้ำยางพารา มีค่า CBR ที่ความหนาแน่นของการบดอัด ร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 54.8 และ 56.4 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าดินซีเมนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ร้อยละ 7.03 และ 10.16 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.4

3. ผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้าง โดยมีอายุการบ่ม 7 วัน พบว่า ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา มีค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 21.25 และ 19.58 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าดินซีเมนต์ที่มีค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 16.78 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ร้อยละ 26.67 และ 16.67

4. ผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดด้านข้าง โดยมีอายุการบ่ม 28 วัน พบว่า ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และน้ำยางพารา มีค่าเท่ากับ 1,278.8 และ 1,116.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ มีค่ามากกว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,025.9 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ร้อยละ 24.26 และ ร้อยละ 8.80 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.6

5. การเปรียบค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ พบว่า การปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์ที่มีค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 16.78 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ และน้ำยางพารา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำ ช่วยเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ให้มีค่ามากกว่า 17.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ ดังนั้น ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพาราจึงสามารถใช้เป็นวัสดุพื้นทางในงานก่อสร้างถนนตามมาตรฐานกรมทางหลวง

บรรณานุกรม

คณะกรรมการกำหนดมาตรการและจัดทำเอกสารอนุรักษ์ดินและน้ำ และการจัดการที่ดิน,มมป. การจัดการดินลูกรัง, กรมพัฒนาที่ดิน, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

จตุรงค์ เสาวภาคย์ไพบูลย์, เดนนิส ที เบอร์กาโด และธนวรัท กฤตภัครพงษ์, 2553, การเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และ น้ำยาโพลิเมอร์เคมโรด", บทความการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15,อุบลราชธานี, 12-14 พฤษภาคม 2553

ชัยวุฒิ วัดจัง, 2558, การปรับปรุงสมบัติไฮโดรฟิลิกของยางธรรมชาติ: การเตรียม การวิเคราะห์, Science and Technology RMUTT Journal, Vol.5, No.2, p 1-16

ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ สถิตย์พงษ์ อภิเมธีธำรง, 2543, การวิเคราะห์โครงสร้างถนนลาดยางที่ มีพื้นทางเป็น Soil-Cement และรองพื้นทางเป็นวัสดุมวลรวมภายใต้น้ำหนักรถบรรทุกปกติถึงหนักมาก, รายงานฉบับที่ ว.พ.176 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทางกรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ

ปรีดิ์เปรม ทัศนกุล, อดุลย์ ณ วิเชียร และ พิศิษฐ์ พิมพ์รัตน์, 2559, นวัตกรรมการผลิตน้ำยางข้นปราศจาก TMTD/ZnO, วารสารยางพารา, ปีที่ 37, ฉบับที่ 3, ฉบับอิเล็กทรอนิกส์ 26, หน้าที่ 2-10

พีรวัฒน์ ปลาเงิน, 2555, การพัฒนาสูตรมอตาร์ผสมน้ำยางพาราสำหรับใช้เป็นตัวเชื่อมประสานรอยร้าวในคลองส่งน้ำชลประทาน, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสยาม

รัฐวุฒิ รู้แทนคุณ, วิรัตน์ สมดอกแก้ว, โชคชัย ชูอินทร์ และรัฐศักดิ์ พ่วงบางยาง, 2549, การพัฒนาอิฐดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพารา,รายงานการวิจัย กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสยาม.

วราภรณ์ ขจรไชยกูล, 2544, อุตสาหกรรมผลิตยางธรรมชาติ, เอกสารประกอบการบรรยาย, สถาบันวิจัยยาง, กรมวิชาการเกษตร ,หน้า 44-45.

วสันต์ ปั้นสังข์ บารเมศ วรรธนะภูติ กฤษณะ เพ็ญสมบูรณ์ และจิรโรจน์ ศุกลรัตน์, 2553, คุณสมบัติด้านความคงทนและความแข็งแรงของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมต์, วิศวกรรมสาร มก., ฉบับที่ 74, ปีที่ 23, หน้าที่ 75-86

วิจัยวิชาการ, แนวทางการพิจารณาโครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแกร่งตัว (Semi-Rigid Pavement) ในงานบูรณะและปรับปรุงทางหลวง, 2555, วารสารทางหลวง ปี 2555 ฉบับที่ 5

วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ และสุรัตน์ ศรีจันทร์, 2552, การศึกษาพฤติกรรมของดินทรายปนทรายแป้งที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการผสมน้ำ ยางพาราธรรมชาติเพื่อใช้ในการป้องกันดินถล่ม, การ

ประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่14, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชศรีมา, 13-15 พฤษภาคม 2552

สุวดี ก้องพารากุล, 2556, เทคโนโลยีการดัดแปรยางธรรมชาติและการประยุกต์ใช้, วารสารวิทยาศาสตร์ มข. ปีที่ 41 ฉบับที่ 3

Czernin, W., 1962, Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers. New York Chemical Publishing, p 36-50

Felt, E.J., 1955, Factor Influencing Physical Properties of Soil-Cement Mixtures, Highway Research Board, Bulletin 108, p 138-163

Mitchell, J.K. and EI Jack, S.A., 1966, The Fabric of Soil-Cement and its Formation, Proceedings of 14th National Conference Clay and Clay Minerals, 26, p 297-305

Ruenkrairergsa, T., 1982, Principle of Soil Stabilization. Group Training in Road Construction, Bangkok. Thailand, p 17-26

Reinhold, F., 1955, Elastic Behavior of Soil-Cement Mixture, Highway Research Board, Bulletin, 108, p 128-137

Winterkorn, H.F. and Chandrasekharn, E.C., 1951, Lateritic Soil and Their Stabilization, Highway Research Board, Bulletin, 44, p 10-29

Clare, K.E. and Pollard, A.E., 1951, The Relationship Between Compressive Strength and Age for Soil Stabilized with Four Type of Cement, Magazine of Concrete Research, 3(8), p 57-64

Fuller, M.G. and Dabney, G.W., 1952, Stabilizing Weak and Defective Bases with Hydrated Lime, Roads and Streets, 95, p 64-69

Lambe, T.W. and Moh, Z.C., 1957, Improvement of Strength of Soil-Cement with Additive, Highway Research Board, Bulletin, 183, p 38-47

Davidson, D.T., Pirte, G.K., Matoes, M. and Kalankamary, P.G., 1962, Moisture-Density, Moisture-Strength and Compaction Characteristics of Cement Treated Soil Mixture, Highway Research Board, Bulletin, 353, p 42-63

Leadabrand, J.A., 1956, Some Engineering Aspects of Soils-Cement Mixture, Mid-South Section, ASCE, April 27, p 64-69

Ingles, O.G and Metcalf, J.B., 1972, Soil Stabilization, Sydney, Butterworth, 63, p 64-69

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ ผ.ศ.ศาสน์ สุขประเสริฐ ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประวัติการศึกษา วุฒิการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต เมื่อ พ.ศ. 2520 วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยขอนแก่น ระดับมหาบัณฑิตเมื่อปี พ.ศ. 2523 M.Eng (Transportation) จาก Asian Institute of Technology (AIT) ,Thailand สาขาวิชาที่มีความชำนาญเป็นพิเศษ Non-Destructive Examination Technology for Quality Control and Maintenance ,Workshop in Oil and Gas Processing Technology,H2S Safety และ Dispensing Pump design ประสบการณ์ที่เกี่ยวกับงานวิจัย เช่น เป็นหัวหน้าโครงการวิจัยโครงการศึกษาการจัดทำแผนแม่บทด้านจราจรและขนส่งภูมิภาคจังหวัดนครราชสีมาได้รับทุนจาก สำนักงานคณะกรรมการจัดระบบจราจรทางบก (สจร.) เมื่อปี พ.ศ. 2539 โครงการศึกษาการจัดทำแผนแม่บทด้านการจราจรและขนส่งเมืองภูมิภาคจังหวัดปราจีนบุรี ได้รับทุนจาก สำนักงานคณะกรรมการจัดระบบจราจรทางบก (สจร.) เมื่อปี พ.ศ. 2541 โครงการจัดทำแผนสร้างทางจักรยานและแผนรณรงค์การใช้จักรยานแบบครบวงจรเทศบาลเมืองนครอุบลราชธานี ได้ทุนจากสำนักงานนโยบายและพลังงาน (สนพ.) เมื่อปี พ.ศ.2546 โครงการศึกษาและพัฒนามาตรฐานการออกแบบทางจักรยาน เมื่อปี พ.ศ.2548 โครงการศึกษาระบบการขนส่งในการผลิตและส่งออกของอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง เมื่อปี พ.ศ.2550 การประเมินเบื้องต้นในการใช้ระบบรถรางไฟฟ้าขนาดเบาสำหรับเมืองนครราชสีมา เมื่อปี 2551 การศึกษาความเป็นไปได้ในการจัดตั้งสถานีขนส่งสินค้าทางบกจังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี 2552 การศึกษาห่วงโซ่อุปทานในกระบวนการผลิตและส่งออกสินค้าการเกษตร เมื่อปี 2553 และอีกหลายงานวิจัย หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติต่อได้ ที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ 0-4422-4421 โทรสาร 0-4422-4220 E-mail: sart@sut.ac.th

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี