



การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดินที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์  
สำหรับงานทาง



ไอรดาภรณ์ หาดแก้ว

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา 2566  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดินที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์  
สำหรับงานทาง



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา 2566  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดินที่ปรับปรุงด้วยพอลิ  
เมอร์สำหรับงานทาง"  
ของ ไอรดาภรณ์ หาดแก้ว  
ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

#### คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุริยาธ ปรอ้าย)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ นุสิทธิ์)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สสิกรณณ์ เหลืองวิชชเจริญ)

อนุมัติ

.....  
(ศาสตราจารย์ไพศาล มณีสว่าง )  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

<b>ชื่อเรื่อง</b>	การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดินที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง
<b>ผู้วิจัย</b>	ไอรดาภรณ์ หาดแก้ว
<b>ประธานที่ปรึกษา</b>	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ นุสิทธิ์
<b>กรรมการที่ปรึกษา</b>	รองศาสตราจารย์ ดร.พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม
<b>ประเภทสารนิพนธ์</b>	วิทยานิพนธ์ วศ.ม. วิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2566
<b>คำสำคัญ</b>	การปรับปรุงคุณภาพวัสดุงานทาง, การปรับปรุงวัสดุงานทางด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์, พอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก (SA), พอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอีน (SBR)

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการจราจรที่มากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างชั้นทางมีการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นอายุการใช้งานจึงสั้นลง โดยบางพื้นที่ถนนอาจมีน้ำท่วมขังทำให้เกิดความชื้น และเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้โครงสร้างชั้นทางเกิดการเสียหาย อีกทั้งการปรับปรุงวัสดุงานทางนั้นกำลังเป็นวิธีที่นิยมในปัจจุบัน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในมุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพในด้านการลดผลกระทบจากความชื้น และเพิ่มประสิทธิภาพทางวิศวกรรมของวัสดุงานทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ ในการทดสอบนี้ใช้มวลรวม 3 ประเภทคือ ดินปลายตะแกรง หินคลุก และวัสดุผิวทางเก่า นำมาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ 2 ชนิดได้แก่ พอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก (SA) และพอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) ที่นิยมใช้ในการกั้นน้ำสำหรับงานเชิงคอนกรีต ทำการออกแบบส่วนผสมที่เหมาะสมโดยการทดสอบประสิทธิภาพในการรับแรงได้แก่ การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) และการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (IDT) การทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนรูอย่างถาวร ( Creep Test) และประสิทธิภาพการทนทานความชื้นได้แก่ การทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดิน (Capillary Rise Test) และการทดสอบความทนทาน (Durability Test) โดยวิธีเปียกสลับแห้ง ผลทดสอบ UCS พบว่า กำลังรับแรงอัดของวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์มีค่าสูงกว่าวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ร้อยละ 41 ตรงกันข้ามกับหินคลุกและวัสดุผิวทางเก่าที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ กลับมีค่าสูงกว่าหินคลุกและวัสดุผิวทางเก่าที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ พอลิเมอร์ประมาณร้อยละ 20 และ 15 ตามลำดับ ผลการทดสอบ IDT พบว่า วัสดุงานทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR นั้นมีกำลังรับแรงดึงที่สูงกว่าวัสดุอื่น ในด้านความทนทานความชื้นผลการทดสอบ Capillary Rise Test พบว่าอัตราการดูดซึมน้ำลดลงเมื่อปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ประมาณร้อยละ 33 นอกจากนี้ผลการทดสอบ Durability Test ยังชี้ให้เห็นว่า วัสดุงานทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์

พอลิเมอร์มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่ลดลงประมาณร้อยละ 40 โดยมีแนวโน้มส่งผลดีในด้านการ  
ทนทานมากขึ้น



<b>Title</b>	ENGINEERING PROPERTIES AND PERFORMANCES OF POLYMER-STABILIZED ROAD MATERIALS.
<b>Author</b>	Iradaporn Hardkaeo
<b>Advisor</b>	Assistant Professor Korakod Nusit, Ph.D.
<b>Co-Advisor</b>	Associate Professor Peerapoong Jitsangiam, Ph.D.
<b>Academic Paper</b>	M.Eng. Thesis in Civil Engineering, Naresuan University, 2023
<b>Keywords</b>	Stabilized pavement materials, Polymer-Stabilized Pavement, Styrene-acrylic Polymer (SA), Styrene-butadiene Rubber (SBR)

### ABSTRACT

This study investigates the impact of high traffic volumes on pavement structures and how flooding in road areas can lead to structural damage. To address these issues, the research examines how pavement materials stabilized with cement and polymers can enhance their engineering performance and reduce moisture damages. The research used three types of aggregate; which are Quarry by Product (QB), Crushed Rock (CR), and Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). The polymer used in this research are Styrene Acrylic polymer (SA) and Styrene Butadiene Rubber (SBR). The findings show that the compressive strength of cement-polymer stabilized QB is higher than cement-stabilized QB. In contrast, the compressive strength of cement-stabilized CR and cement-stabilized RAP are higher than the compressive strength of cement-polymer stabilized RAP and CR. The study also reveals that cement-SBR stabilized pavement materials have higher indirect tensile strength than the other types. The moisture durability assessments demonstrate the reduction in water absorption rates of materials modified with cement-polymer, and the Capillary Rise test shows the decreasing in water absorption. The Durability test demonstrates the reduction in weight loss, highlighting the positive impact of polymer cement modification on moisture resistance.



## ประกาศคุณูปการ

งานวิจัยนี้ ส่วนหนึ่งได้รับเงินสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ประจำปี 2562 เลขที่โครงการ MRG6280053 สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. กรกฎ นุสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยสนับสนุนและให้คำแนะนำในงานวิจัยและด้านการดำเนินชีวิต และขอขอบพระคุณโรงโม่หินบ้านศิลาจังหวัดสุโขทัยที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดินปลาย ตะแกรงและหินคลุกสำหรับการทดสอบในงานวิจัย อีกทั้งขอบพระคุณ นายณัฏฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์ นายณัฐนนท์ คุ่มครุฑ และนายภูริชัย แก้วมา เพื่อนพ้องระดับปริญญาโทมหาวิทยาลัยนเรศวรที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาและช่วยเหลือทุกปัญหาตลอดการทำวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ต้องขอขอบพระคุณ คุณป้าและน้องชายที่เป็นกำลังใจและช่วยเหลือในทุกด้านของชีวิต และสุดท้ายขอขอบพระคุณความรักที่ยิ่งใหญ่ของบิดา มารดา ผู้ให้ชีวิตอบรมเลี้ยงดูจนเติบโต ใฝ่มองความสำเร็จและเป็นกำลังใจเสมอมาจากบนฟ้า

ไอรดาภรณ์ หาดแก้ว



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
ประกาศคุุณูปการ .....	ช
สารบัญ .....	ซ
สารบัญตาราง.....	๗
สารบัญรูปภาพ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	4
1.6 แผนการดำเนินงาน .....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 คุณสมบัติของดินและสารผสมเพิ่มที่ส่งผลกระทบต่อวัสดุงานทาง.....	5
2.1.1 ประเภทของชนิดดินส่งผลกระทบต่องานทาง.....	5
2.1.2 ปริมาณและประเภทปูนซีเมนต์.....	5
2.1.3 เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพ.....	5
2.1.4 ปริมาณความชื้น.....	5

2.2 การปรับปรุงคุณภาพวัสดุสำหรับงานทาง .....	6
2.3 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ .....	8
2.4 มาตรฐานกรมทางหลวงสำหรับการปรับปรุงดินซีเมนต์ .....	9
2.5 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยพอลิเมอร์ .....	12
2.5.1 พอลิเมอร์ธรรมชาติ .....	12
2.5.2 พอลิเมอร์สังเคราะห์ .....	14
2.6 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยพอลิเมอร์สังเคราะห์ .....	15
2.6.1 การปรับปรุงคุณภาพดินด้านประสิทธิภาพกำลังรับแรงด้วยพอลิเมอร์ สังเคราะห์ .....	15
2.6.2 การปรับปรุงคุณภาพดินด้านประสิทธิภาพการทนทานความชื้นด้วยพอลิเมอร์ สังเคราะห์ .....	16
2.7 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ .....	17
2.7.1 คุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวม .....	17
2.7.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรม .....	23
2.7.3 คุณสมบัติผลกระทบของความชื้น .....	27
2.8 บทสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	31
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย .....	32
3.1 แผนผังวิธีการดำเนินงาน .....	32
3.2 การคัดเลือกวัสดุ .....	33
3.2.1 มวลรวม .....	33
3.2.2 พอลิเมอร์ .....	36
3.3 การทดสอบคุณสมบัติวัสดุมวลรวม .....	38

3.3.1 X-ray Diffraction (XRD).....	38
3.3.2 Scanning electron microscopy (SEM).....	39
3.3.4 การทดสอบหาขนาดคละของมวลรวมโดยการร่อนผ่านตะแกรง .....	39
3.3.5 การทดสอบค่าขีดความชื้นเหลวของดิน Liquid Limits .....	40
3.3.5 การทดสอบหาค่า Plastic Limit (P.L.) และ Plasticity Index (P.I.) .....	41
3.3.6 การทดสอบหาค่าการสึกหรอด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion.....	42
3.3.7 การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน .....	44
3.4 การออกแบบอัตราส่วนผสม.....	46
3.4.1 การออกแบบอัตราส่วนผสมของมวลรวมปรับปรุงด้วยซีเมนต์ .....	46
3.4.2 การออกแบบอัตราส่วนผสมของมวลรวมปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ .....	46
3.5 การทดสอบประสิทธิภาพกำลังรับแรง.....	47
3.5.1 การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test, UCS) .....	47
3.5.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength).....	48
1.5.3 การทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Dynamic Creep Test) ..	50
3.6 การทดสอบประสิทธิภาพความทนทานความชื้น .....	53
3.6.1 การทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดิน (Capillary Rise Test) .....	53
3.6.2 การทดสอบความทนทาน (Durability Test) โดยวิธีเปียกสลับแห้ง .....	55
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล .....	57
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวม .....	57
4.1.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุดินปลายตะแกรง .....	57
4.1.2 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุหินคลุก.....	59
4.1.3 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผิวทางเก่า .....	61

4.2 การทดสอบออกแบบอัตราส่วนผสม.....	64
4.2.1 การออกแบบอัตราส่วนผสมระหว่างพอลิเมอร์และน้ำ .....	64
4.2.2 การออกแบบหาปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม.....	66
4.2.3 การออกแบบอัตราส่วนผสมของมวลรวมปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์.....	68
4.3 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน .....	69
4.3.1 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุดินปลายตะแกรง ที่ปรับปรุงคุณภาพ.....	70
4.3.2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุหินคลุกที่ปรับปรุงคุณภาพ.....	71
4.3.2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุผิวทางเก่าที่ปรับปรุงคุณภาพ.....	72
4.5 อัตราส่วนผสมและขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ .....	75
4.6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพกำลังรับแรง .....	77
4.6.1 ผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test, UCS).....	77
4.6.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) .....	80
4.6.3 ผลการทดสอบต้านทานการเปลี่ยนรูอย่างถาวร (Dynamic Creep Test) ....	85
4.6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพความทนทานความชื้น.....	88
4.6.1 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดิน (Capillary Rise Test).....	88
4.6.2 ผลการทดสอบความทนทาน (Durability Test) โดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wetting and drying).....	91
4.6 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลโครงสร้างระดับจุลภาค (Micro structure) .....	95
4.6.1 X-ray Diffraction (XRD) .....	95
4.6.1 ผลการทดสอบ X-ray Diffraction (XRD) ของวัสดุมวลรวม .....	95

4.6.2 Scanning electron microscopy (SEM).....	97
4.7 พฤติกรรมทางวิศวกรรมและโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุมวลรวมและวัสดุเชื่อม ประสาน.....	100
4.8 ผลการศึกษาความเหมาะสมในการก่อสร้างของวัสดุงานทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย ซีเมนต์พอลิเมอร์ .....	104
4.9 ผลกระทบจากการใช้งานจริงตามข้อกำหนดการออกแบบชั้นพื้นทางและรองพื้น ทาง ตามมาตรฐานกรมทางหลวง .....	105
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	108
5.1 ประเมินพฤติกรรมภายในโครงสร้างระดับจุลภาค (Micro structure) ของมวลรวมที่ มีการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์.....	108
5.2 ประเมินอัตราส่วนผสมที่ส่งผลกับประสิทธิภาพทางวิศวกรรมในด้านกำลังรับแรง ของมวลรวมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ .....	108
5.3 ประเมินประสิทธิภาพในด้านความคงทนความชื้นของมวลรวมที่มีการปรับปรุง ด้วย ซีเมนต์พอลิเมอร์ .....	109
บรรณานุกรม.....	111
ภาคผนวก ก .....	121
ภาคผนวก ข .....	151
ภาคผนวก ค .....	182
ประวัติผู้วิจัย .....	194

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 สรุปข้อกำหนดมาตรฐานกรมทางหลวง.....	9
ตารางที่ 2-2 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์.....	12
ตารางที่ 2-3 สรุปคุณสมบัติพื้นฐานมวลรวมที่ส่งผลต่อพฤติกรรมวัสดุงานทาง .....	17
ตารางที่ 2-4 ค่า standard unit load ที่ความลึกต่าง ๆ.....	22
ตารางที่ 2-5 เปรียบเทียบร้อยละ CBR กับลักษณะการใช้งานทางวิศวกรรม.....	23
ตารางที่ 2-6 การจำลองความเสียหายของวัสดุ .....	27
ตารางที่ 3-3-1 คุณสมบัติของพอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก (SA) .....	36
ตารางที่ 3-2 พอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอิน (SBR) .....	38
ตารางที่ 3-3 Grading สำหรับการจัดกลุ่มการทดสอบและจำนวนรอบ .....	43
ตารางที่ 3-4 จำนวน Abrasive Charge จำแนกตาม Grading ของตัวอย่าง .....	43
ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุดินปลายตะแกรง.....	57
ตารางที่ 4-2 ร้อยละผ่านตะแกรงวัสดุดินปลายตะแกรง .....	58
ตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุหินคลุก.....	59
ตารางที่ 4-4 ร้อยละผ่านตะแกรงของวัสดุหินคลุก.....	59
ตารางที่ 4-5 ร้อยละผ่านตะแกรงของวัสดุผิวทางเก่า .....	61
ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผิวทางเก่า .....	62
ตารางที่ 4-7 สรุปความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุดินปลาย ตะแกรง ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์.....	64
ตารางที่ 4-8 สรุปอัตราส่วนผสมของมวลรวมปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ .....	68

ตารางที่ 4-9 สรุปความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุมวลรวม ...	69
ตารางที่ 4-10 สรุปผลการทดสอบความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของ วัสดุหินคลุก .....	70
ตารางที่ 4-11 สรุปผลการทดสอบความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของ วัสดุหินคลุก .....	71
ตารางที่ 4-12 สรุปความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุผิวทางเก่า .....	72
ตารางที่ 4-13 อัตราส่วนผสมสำหรับตัวอย่างแบบที่ 1 .....	75
ตารางที่ 4-14 อัตราส่วนผสมสำหรับตัวอย่างแบบที่ 2 .....	76
ตารางที่ 4-15 ตารางสรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด .....	79
ตารางที่ 4-16 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างกำลังรับแรงดึงทางอ้อม .....	83
ตารางที่ 4-17 สรุปผล Creep Stiffness ที่ระยะเวลา 2000 วินาที .....	87
ตารางที่ 4-18 การเปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวม .....	90
ตารางที่ 4-19 สรุปอัตราการย่อยและการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุ .....	93
ตารางที่ 4-20 สรุปข้อมูลการวิเคราะห์พื้นที่ช่องว่างของตัวอย่าง .....	101
ตารางที่ 4-21 สรุปผลความเหมาะสมในการก่อสร้างของวัสดุมวลรวม .....	104
ตารางที่ 4-22 สรุปผลความเหมาะสมในการก่อสร้างของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิ เมอร์ .....	104
ตารางที่ 4-23 การจำแนกโครงสร้างชั้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์สาธารณรัฐแอฟริกาใต้ .....	106
ตารางที่ 4-24 เปรียบเทียบเกณฑ์และผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม .....	107

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความเหนียวแน่นของดิน.....	6
รูปที่ 2-2 ลักษณะเถ้าลอย (Fly ash).....	7
รูปที่ 2-3 ลักษณะปูนขาว (Lime).....	7
รูปที่ 2-4 ปูนซีเมนต์และมวลรวม.....	8
รูปที่ 2-5 น้ํายางสดที่ได้จากการกรีดต้นยางพารา.....	13
รูปที่ 2-6 รอยแตกบนผิวทาง (Crack) ประเภทรอยแตกจระเข้.....	16
รูปที่ 2-7 ผิวทางชำรุดจากอุทกภัย.....	16
รูปที่ 2-8 กราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน.....	19
รูปที่ 2-9 กราฟแสดงสถานะของดิน.....	20
รูปที่ 2-10 เส้นโค้งการบดอัดของดิน.....	21
รูปที่ 2-11 การทดสอบ California Bearing Ratio.....	22
รูปที่ 2-12 การทดสอบแรงอัดแกนเดียว.....	23
รูปที่ 2-13 การให้น้ําน้ําน้ํากกระทำต่อก้อนตัวอย่างและลักษณะการแตกร้าวก้อนตัวอย่าง..	25
รูปที่ 2-14 การทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร.....	26
รูปที่ 2-15 การทดสอบ Cyclic impact erosion.....	27
รูปที่ 2-16 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อน.....	28
รูปที่ 2-17 การดูดซึมน้ําน้ําน้ํามวลดิน.....	29
รูปที่ 2-18 การทดสอบความทนทาน (Durability Test).....	30
รูปที่ 3-1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	32



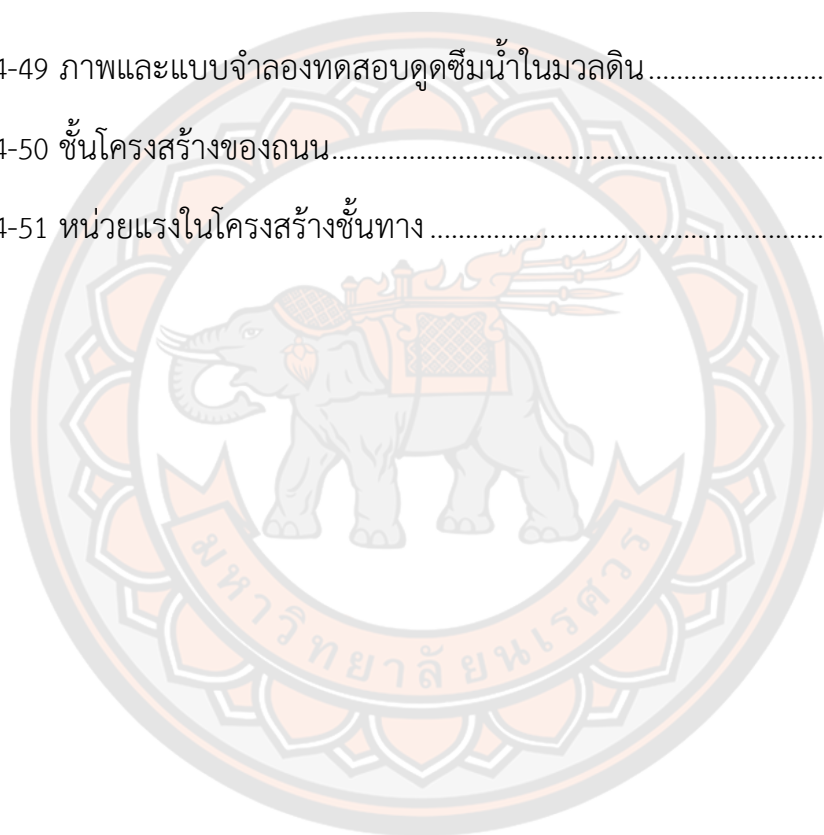
รูปที่ 3-2 ดินปลายตะแกรง.....	33
รูปที่ 3-3 หินคลุก .....	34
รูปที่ 3-4 วัสดุผิวทางเก่า .....	34
รูปที่ 3-5 การรื้อหรือตัดชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเดิมโดยวิธี Ripping.....	35
รูปที่ 3-6 การรื้อหรือตัดชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเดิมแบบเย็น (Cold Milling).....	35
รูปที่ 3-7 พอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก (SA).....	36
รูปที่ 3-8 พอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอีน (SBR).....	37
รูปที่ 3-9 แสดงการเตรียมตัวอย่าง X-ray Diffraction (XRD).....	38
รูปที่ 3-10 การหาขนาดคละของมวลรวมโดยการร่อนผ่านตะแกรง.....	39
รูปที่ 3-11 การทดสอบค่า Liquid Limits.....	40
รูปที่ 3-12 การทดสอบ Plastic Limit.....	41
รูปที่ 3-13 การทดสอบหาค่าการสึกหรอ .....	42
รูปที่ 3-14 การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน.....	44
รูปที่ 3-15 การทดสอบแรงอัดแกนเดียว.....	47
รูปที่ 3-16 การทดสอบ Indirect Tensile Strength .....	48
รูปที่ 3-17 การทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร .....	50
รูปที่ 3-18 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร.....	51
รูปที่ 3-19 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับการกรอกลงในโปรแกรมใช้กับเครื่อง UTM .....	52
รูปที่ 3-20 ก่อนตัวอย่างหลังจากการบ่มเป็นเวลา 7 วัน.....	53
รูปที่ 3-21 ทำการทดสอบแช่น้ำเป็นเวลา 72 ชั่วโมง.....	53
รูปที่ 3-22 การวัดค่าและการชั่งน้ำหนักหลังจากแช่น้ำ 72 ชั่วโมง .....	54
รูปที่ 3-23 นำตัวอย่างที่ทำการบ่มครบเวลา 7 วัน นำมาแช่น้ำเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง ...	55

รูปที่ 3-24 ตัวอย่างหลังจากการอบ นาน 42 ชั่วโมง .....	55
รูปที่ 3-25 การขัดตัวอย่างดินด้วยแปรงทองเหลือง .....	56
รูปที่ 4-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคมวลรวม และร้อยละผ่านตะแกรงของ วัสดุดินปลายตะแกรง.....	58
รูปที่ 4-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคมวลรวม และร้อยละผ่านตะแกรงของ วัสดุหินคลุก .....	60
รูปที่ 4-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคมวลรวมและร้อยละผ่านตะแกรง ของ วัสดุผิวทางเก่า.....	61
รูปที่ 4-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคมวลรวมและร้อยละผ่านตะแกรง ของ วัสดุผิวทางเก่าผสมดินปลายตะแกรงที่อัตราส่วน ( 2 ต่อ 1).....	62
รูปที่ 4-5 วัสดุผิวทางเก่าผสมดินปลายตะแกรงที่อัตราส่วน ( 2 ต่อ 1).....	63
รูปที่ 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้ง สูงสุด ของวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ .....	64
รูปที่ 4-7 ก้อนตัวอย่างที่เสียรูปจากความชื้น.....	65
รูปที่ 4-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสม ของ วัสดุดินปลายตะแกรง.....	66
รูปที่ 4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับปริมาณร้อยละซีเมนต์ ต่างๆ ของวัสดุดินปลายตะแกรง.....	66
รูปที่ 4-10 กราฟความสัมพันธ์ความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุ มวลรวม.....	69
รูปที่ 4-11 กราฟความสัมพันธ์ความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุด ของวัสดุ ดินปลายตะแกรง .....	70
รูปที่ 4-12 กราฟความสัมพันธ์ความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุด ของวัสดุ หินคลุกที่ปรับปรุงคุณภาพ .....	71

รูปที่ 4-13 กราฟความสัมพันธ์ความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุด ของวัสดุ ผิวทางเก่าที่ปรับปรุงคุณภาพ.....	72
รูปที่ 4-14 การเปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งสูงสุดจากการทดสอบการบดอัด แบบสูง กว่ามาตรฐานของวัสดุ.....	73
รูปที่ 4-15 การเปรียบเทียบความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุ.....	74
รูปที่ 4-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคมวลรวมและร้อยละผ่านตะแกรงของ วัสดุ.....	74
รูปที่ 4-17 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินปลายตะแกรง .....	77
รูปที่ 4-18 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของหินคลุก.....	78
รูปที่ 4-19 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุผิวทางเก่า .....	78
รูปที่ 4-20 ก้อนตัวอย่างกำลังรับแรงดึงทางอ้อม.....	80
รูปที่ 4-21 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินปลายตะแกรง.....	80
รูปที่ 4-22 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของหินคลุก .....	81
รูปที่ 4-23 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุผิวทางเก่า .....	81
รูปที่ 4-24 กราฟการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ ประเภทไม่แช่น้ำ .....	82
รูปที่ 4-25 กราฟการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ ประเภทแช่น้ำ.....	82
รูปที่ 4-26 ลักษณะ Load Pattern ของการทดสอบต้านทานการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Dynamic Creep Test) .....	85
รูปที่ 4-27 ความสัมพันธ์ระหว่าง Creep Stiffness และเวลาของวัสดุดินปลายตะแกรง..	86
รูปที่ 4-28 การทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดิน .....	88
รูปที่ 4-29 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดินของวัสดุดินปลายตะแกรง.....	88

รูปที่ 4-30 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดินของวัสดุหินคลุก .....	89
รูปที่ 4-31 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดินของวัสดุผิวทางเก่า .....	89
รูปที่ 4-32 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักและจำนวนรอบของดินปลาย ตะแกรง .....	91
รูปที่ 4-33 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักและจำนวนรอบของหินคลุก	92
รูปที่ 4-34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักและจำนวนรอบของวัสดุผิว ทางเก่า .....	93
รูปที่ 4-35 กราฟแสดงผลการทดสอบองค์ประกอบเคมีด้วยวิธี X-ray Diffraction (XRD) ของวัสดุดินปลายตะแกรง .....	95
รูปที่ 4-36 กราฟแสดงผลการทดสอบองค์ประกอบเคมีด้วยวิธี X-ray Diffraction (XRD) ของวัสดุผิวทางเก่า .....	95
รูปที่ 4-37 กราฟ X-ray diffraction pattern ของวัสดุดินปลายตะแกรง ที่ปรับปรุงด้วยพอลิ เมอร์ .....	96
รูปที่ 4-38 ภาพ SEM ของวัสดุดินปลายตะแกรง .....	97
รูปที่ 4-39 ภาพ SEM ของวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยอัตราส่วนพอลิเมอร์:น้ำ (100-0) .....	97
รูปที่ 4-40 ภาพ SEM ของวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยอัตราส่วนพอลิเมอร์:น้ำ (50-50) .....	98
รูปที่ 4-41 ภาพ SEM ของวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่อายุบ่ม 7 วัน ...	98
รูปที่ 4-42 ภาพ SEM ของวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่อายุบ่ม 28 วัน .	99
รูปที่ 4-43 ภาพ SEM ของวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ที่อายุบ่ม 7 วัน .....	99
รูปที่ 4-44 ภาพ SEM ของวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ที่อายุบ่ม 28 วัน .....	99

รูปที่ 4-45 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุดินปลายตะแกรง.....	100
รูปที่ 4-46 การวิเคราะห์พื้นที่ช่องว่างของตัวอย่าง.....	101
รูปที่ 4-47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินปลาย ตะแกรง.....	102
รูปที่ 4-48 ระนาบการวิบัติของวัสดุดินปลายตะแกรงของตัวอย่างจากการทดสอบ UCS ประเภทไม่แข็งน้ำ.....	103
รูปที่ 4-49 ภาพและแบบจำลองทดสอบดูดซึมน้ำในมวลดิน.....	103
รูปที่ 4-50 ชั้นโครงสร้างของถนน.....	105
รูปที่ 4-51 หน่วยแรงในโครงสร้างชั้นทาง.....	106



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

การพัฒนาโครงข่ายการคมนาคมขนส่ง มีบทบาทสำคัญต่อการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและการท่องเที่ยวของประเทศไทย ถนนเป็นโครงสร้างพื้นฐานหลักที่รองรับการจราจรที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่ออายุการใช้งานที่สั้นลง อีกทั้งสภาพภูมิอากาศที่ร้อน สลับกับฝนตก และน้ำท่วมขัง ล้วนเป็นปัจจัยเร่งการเสื่อมสภาพของถนน เกิดปัญหาชั้นทางหลุดตัวต้องบำรุงรักษาและซ่อมแซมบ่อยครั้ง ในการก่อสร้างถนนใหม่ และซ่อมแซมบริเวณที่เกิดความเสียหายนั้นจะมีการนำวัสดุจากทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดมาใช้ในการก่อสร้างเพิ่มขึ้น มวลรวมสำหรับการก่อสร้างนั้นได้จากการระเบิดหิน จากนั้นลำเลียงสูโรงโม่หินเพื่อทำการบดและย่อยขนาดหิน จากกระบวนการย่อยหินนั้นจะมีมวลรวมเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการผลิตซึ่งมีคุณสมบัติที่ไม่ผ่านมาตรฐานของกรมทางหลวงซึ่งในงานวิจัยนี้เรียกว่า ดินปลายตะแกรง (Quarry by product) ซึ่งวัสดุข้างต้นนั้นเป็นวัสดุเหลือทิ้งซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อย ส่วนใหญ่นิยมนำไปถมที่ อีกทั้งยังมีวัสดุที่ถูกขุดลอกจากผิวทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement : RAP) ที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากการก่อสร้าง จึงเป็นแนวคิดในการนำวัสดุทั้งสองชนิดข้างต้นนั้นเป็นมวลรวมเพื่อใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้างถนนเพื่อลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ

ถึงแม้ว่าการปรับปรุงคุณภาพของมวลรวมนั้นปัจจุบันนี้มีหลายวิธี ซึ่งในประเทศไทยมีการนำดินผสมซีเมนต์ (Soil Cement) มาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินแต่ก็ยังมีปัญหาบางประการเช่น วัสดุมีคุณสมบัติความแข็งที่เพิ่มมากขึ้น แต่ขาดความยืดหยุ่น และยังไม่สามารถทนการเปลี่ยนแปลงความชื้นในมวลดินได้ จึงส่งผลให้เกิดการแตกร้าวของชั้นทาง ในการแก้ปัญหาดังกล่าวมีการนำพอลิเมอร์มาใช้เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นของวัสดุ เช่นเดียวกันกรมทางหลวงมีการนำน้ำยางพาราซึ่งเป็นพอลิเมอร์ตามธรรมชาติมาปรับปรุงคุณภาพถนน ตามข้อกำหนดพิเศษที่ สว พิเศษ 1/2560 การก่อสร้างถนนตามข้อกำหนดพิเศษข้างต้น มีการควบคุมมาตรฐานด้วยการทดสอบคุณภาพต่าง ๆ โดยยางพาราธรรมชาตินั้นมีการสูญเสียสภาพเร็ว และไม่มีข้อกำหนดเกี่ยวกับเรื่องการทดสอบทนทานของดินจากผลกระทบของความชื้น ในงานเชิงคอนกรีตได้มีการนำพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดสไตรีนอะคริลิก (SA) และ สไตรีนบิวตาไดอิน (SBR) มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกันน้ำและรั่วซึมของคอนกรีต จึงเลือกใช้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดดังกล่าวนี้มาปรับปรุงประสิทธิภาพมวลรวมเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการทนทานความชื้นสำหรับงานทาง

จากแนวคิดในการปรับปรุงมวลรวมด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ ประกอบกับปัญหาในเรื่องความชื้นที่ก่อให้เกิดความเสียหายในโครงสร้างถนน และการปรับปรุงคุณภาพของการปรับปรุงดินซีเมนต์ด้วยน้ำยางพาราในประเทศไทยนั้นอัตราส่วนผสมยังไม่มีมีการเผยแพร่ในงานวิจัยใด อีกทั้งผู้วิจัยยังทำการศึกษางานวิจัยทั้งในและต่างประเทศ (Fauziah Ahmad, 2013; Ismail et al., 2017) พบว่าการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยพอลิเมอร์ยังให้ความสำคัญเฉพาะการศึกษาเกี่ยวกับกำลังรับน้ำหนัก ซึ่งยังไม่นิยมทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของความชื้นและความคงทน (Durability) ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นศึกษาคุณสมบัติของงานทางที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ประสิทธิภาพทนทานต่อความชื้นและสภาพอากาศเปลี่ยนแปลงค่อนข้างสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกันน้ำและศึกษาถึงผลกระทบจากความชื้น เพื่อเป็นแนวทางในการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนสำหรับงานก่อสร้างถนนในชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อประเมินพฤติกรรมภายในโครงสร้างระดับจุลภาค (Micro structure) ของมวลรวมที่มีการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์

1.2.2 เพื่อประเมินอัตราส่วนผสมที่ส่งผลกับประสิทธิภาพทางวิศวกรรมในด้านกำลังรับแรงของมวลรวมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์

1.2.3 เพื่อประเมินประสิทธิภาพในด้านความคงทนความชื้นของมวลรวมที่มีการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

### 1.3.1 การคัดเลือกวัสดุ

(1) มวลรวมจำนวน 2 แหล่ง รวมทั้งหมด 3 ชนิดได้แก่ ดินปลายตะแกรง และหินคลุก จากโรงโม่หินบ้านศิลาพัฒนา จ.สุโขทัย

-วัสดุผิวทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP)

(2) พอลิเมอร์ 2 ชนิดได้แก่ พอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก (SA) และพอลิเมอร์สไตรีน-บิวตาไดอีน (SBR)

(3) ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

### 1.3.2 ออกแบบอัตราส่วนผสม

(1) ออกแบบอัตราส่วนผสมระหว่างมวลรวมทั้ง 3 ชนิดที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ผสมพอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก (SA) ตามมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์และรองพื้นทางซีเมนต์

(2) ออกแบบอัตราส่วนผสมระหว่างมวลรวมทั้ง 3 ชนิดที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ผสมพอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) ตามมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์และรองพื้นทางซีเมนต์

### 1.3.3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

#### (1) โครงสร้างระดับจุลภาค (Micro structure)

เป็นการศึกษาองค์ประกอบของแร่ภายในมวลรวม และปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น รวมไปถึงลักษณะการจับตัวของมวลรวมและพอลิเมอร์ โดยประกอบทดสอบดังนี้

- X-ray Diffraction (XRD)
- Scanning electron microscopy (SEM)

#### (2) การทดสอบประสิทธิภาพทางวิศวกรรมศาสตร์

เป็นการทดสอบเพื่อพิจารณาประสิทธิภาพหลังจากการปรับปรุงคุณภาพ โดยก่อนตัวอย่างจะต้องทำการบ่มเป็นเวลา 7 วันประกอบด้วยทดสอบดังนี้

- การทดสอบด้านประสิทธิภาพกำลังรับน้ำหนัก มีการทดสอบดังนี้

- การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test)
- การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength)

- การทดสอบการทดสอบด้านทานการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร (Dynamic Creep Test)

- การทดสอบด้านประสิทธิภาพความทนทานความชื้น มีการทดสอบดังนี้

- การทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดิน (Capillary Rise Test)
- การทดสอบความทนทาน (Durability Test)

1.3.4 เปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาในโครงสร้างระดับจุลภาคกับการทดสอบด้านประสิทธิภาพทางวิศวกรรมศาสตร์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถใช้วัสดุเหลือทิ้ง เพื่อทดแทนมวลรวมหินคลุกสำหรับชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง เป็นการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และเป็นมิตรต่อสภาพแวดล้อม

1.4.2 ได้ทราบถึงประสิทธิภาพด้านความทนทานความชื้นของมวลรวมที่ปรับปรุงคุณภาพซีเมนต์พอลิเมอร์นั้นมีความเป็นไปได้ในการทนทานของความชื้นได้เพิ่มขึ้น เพื่อลดปัญหาการชำรุดของชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทาง





## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 คุณสมบัติของดินและสารผสมเพิ่มที่ส่งผลกระทบต่อวัสดุงานทาง

##### 2.1.1 ประเภทของชนิดดินส่งผลกระทบต่องานทาง

ดินเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการสลายตัวทางกายภาพ และทางเคมีของหินและแร่ ใช้ในการก่อสร้างหรือใช้เป็นวัสดุถม ซึ่งงานประเภทของดินนั้นส่งผลต่อกำลังคุณสมบัติของวิศวกรรมกำลังรับน้ำหนัก อาทิเช่น

- ดินลูกรัง หรือดินปนกรวด หรือเศษหินในระดับต่ำกว่า 50 เซนติเมตรจากผิวดิน เกิดจากการผุพังของหินต้นกำเนิดเดิม ส่วนใหญ่เป็นหินทราย หินบะซอลท์ และหินดินดาน เป็นดินที่มีชั้นส่วนหยาบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ปะปนในปริมาณมากกว่าร้อยละ 35 เมื่อนำมาบดอัดดินลูกรังสามารถสามารถรับแรงเฉือนได้สูงจึงนิยมนำมาใช้เป็นงานทาง

- ดินเหนียว เป็นดินที่มีขนาดเม็ดละเอียด มีขนาดผ่านตะแกรงทดสอบเบอร์ 200 มีลักษณะเป็นแผ่นแบนบางหรือเกล็ด ดินเหนียวประกอบด้วยแร่ธาตุจำพวก Mica และ Clay minerals เป็นแร่ธาตุที่มีคุณสมบัติความเป็นประจุจึงสามารถเชื่อมแน่นภายในโครงสร้างรูปร่างของเม็ดดินเหนียวจะถูกบดอัดและยุบตัวได้ง่ายภายใต้น้ำหนักคงที่ ทนต่อแรงกระแทกหรือแรงสั่นสะเทือนได้มาก

- ดินดาน มีส่วนประกอบของแร่และหินเป็นหลักมีสารอินทรีย์น้อย พบว่ามีลักษณะเป็นดินแห้ง สีออกเหลือง เมื่อนำมาบดอัดแล้ว มีความแน่นสูงนิยมใช้ถมพื้นที่และถนน

##### 2.1.2 ปริมาณและประเภทปูนซีเมนต์

ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดนั้นขึ้นอยู่กับ ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมต่อมวลรวม โดยกำลังรับแรงจะเพิ่มขึ้นตาม อีกทั้งประเภทของปูนที่แตกต่างกันย่อม รวมไปถึงระยะเวลาการบ่มโดยปัจจัยทั้งหมดที่กล่าวมานั้น สามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการรับแรง

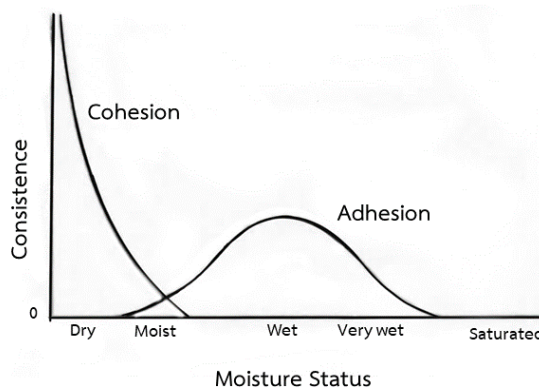
##### 2.1.3 เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพ

เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพที่แตกต่างกันประกอบด้วย ความเร็วในการผสม วิธีการบดอัด ระยะเวลาและวิธีการบ่ม เป็นต้น

##### 2.1.4 ปริมาณความชื้น

ในกรณีที่เป็ดินซีเมนต์น้ำจะเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดชันระหว่างน้ำและซีเมนต์ แรงยึดระหว่างโมเลกุล (Cohesion) เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของสารชนิดเดียวกัน จะน้อยลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น และแรงตึงผิว (Adhesion) คือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค

ต่างชนิด นั้นจะเห็นได้ว่าจะมีความชื้นในดินเพิ่มขึ้นแรงดึงผิวจะเพิ่มขึ้น แต่หากความชื้นเพิ่มมากขึ้นนั้นแรงดึงผิวจะลดลง อีกทั้งยังส่งผลต่อความเหนียวแน่นของดิน (Consistence) ดังรูป 2-1



รูปที่ 2-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความเหนียวแน่นของดิน  
(ที่มา: [http://www.lib.kps.ku.ac.th/SpecialProject/Agricultural\\_Engineering](http://www.lib.kps.ku.ac.th/SpecialProject/Agricultural_Engineering))

## 2.2 การปรับปรุงคุณภาพวัสดุสำหรับงานทาง

ในปัจจุบันการปรับปรุงคุณภาพดินนั้นมีหลากหลายวิธีเพื่อให้คุณสมบัติของดินที่ด้อยคุณภาพนั้นมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีขึ้น (กฤตย์ คมขำ, 2554) เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม กล่าวคือ

1. การปรับปรุงคุณภาพดินในเชิงกล
2. การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีไฮดรอลิก
3. การปรับปรุงคุณภาพดินโดยการเสริมกำลังเช่นการใช้ตาข่าย (Mesh) และ
4. ปรับปรุงคุณภาพดินเชิงกายภาพและเชิงเคมีซึ่งเป็นที่นิยมสำหรับงานถนน โดยทำการเติมสารผสมเพิ่มลงในดินเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพจากการศึกษางานวิจัยในอดีตทั้งในและต่างประเทศ นิยมใช้สารผสมเพิ่ม อาทิเช่น

- การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเถ้าลอย (Fly ash)



รูปที่ 2-2 ลักษณะเถ้าลอย (Fly ash)

(ที่มา : <https://www.be2hand.com/1179475-13.html>)

อำนาจ เทียนพัต (2545) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรังผสมเถ้าลอยและหินฝุ่น เพื่อศึกษากำลัรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive Strength, UCS) ค่า Unsoaked C.B.R. และค่า Soaked C.B.R. โดยจากผลการทดสอบในบริเวณที่ไม่มีน้ำท่วมขัง ค่ากำลัรับแรงอัดแกนเดียว และค่า Unsoaked C.B.R. ให้ค่าสูงขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณหินฝุ่นเพิ่มขึ้น

- การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนขาว (Lime)



รูปที่ 2-3 ลักษณะปูนขาว (Lime)

(ที่มา : <https://thai.alibaba.com/product-detail/hydrated-lime-104707592.html>)

P. Indiramma (2019) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวที่เกิดการบวมตัวด้วยปูนขาวร้อยละ 4 และ 8 จากการทดสอบพบว่า ซีดจำกัดความเหลว ซีดจำกัดพลาสติก ดัชนีความเหนียวของดินความชื้นที่เหมาะสม และดัชนีบวมตัวลดลง ในขณะที่น้ำหนักสูงสุดหน่วยแห้งและความแข็งแรงของส่วนผสมของดินเพิ่มขึ้น

### 2.3 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์



รูปที่ 2-4 ปูนซีเมนต์และมวลรวม

ดินซีเมนต์ (Soil Cement) คือดินที่ปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ปูนซีเมนต์และน้ำในความชื้นที่เหมาะสม เมื่อทำการบดอัดแล้วนั้นเมื่อการผสมระหว่างน้ำและซีเมนต์กันเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทั้งนี้กำลังรับแรงจะเพิ่มขึ้นตามระยะของการบ่ม การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์นั้นจึงเป็นที่นิยมอย่างมากเนื่องจากสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของดินให้ดีขึ้น อาทิเช่นงานวิจัยดังต่อไปนี้

The Siam Cement Company (1965) ได้เริ่มทำการก่อสร้างชั้นพื้นทางด้วยดินผสมซีเมนต์เป็นถนนสายแรกในประเทศไทย ก่อสร้างบนถนนสายวารินชำราบ-เดชอุดม จังหวัดอุบลราชธานี มีความยาว 5 กิโลเมตร พบว่าดินลูกรังผสมซีเมนต์ร้อยละ 3 ถึง 7 นั้นจะให้กำลังความแข็งแรงในอยู่ในช่วงค่าแคลิฟอร์เนีย แบริง เรโซ (California Bearing Ratio, CBR) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 120 และ Unconfined compressive Strength เท่ากับ 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

Supasit Pongsivasathita และคณะ (2017) ได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณซีเมนต์ที่มีต่อความแข็งแรงด้วยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compression strength) การทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริง เรโซ (California Bearing Ratio) การทดสอบแรงกดทับด้วยแผ่นเหล็ก (Plate load test) ของตัวอย่างดิน 3 ชนิดได้แก่ ดินทราย ดินลูกรัง และดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ร้อยละ 3 5 7 9 และ 11 หลังจากการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน ผลการทดสอบพบว่า วัสดุการปรับเสถียรภาพทั้ง 3 ชนิดมีกำลังเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น

#### 2.4 มาตรฐานกรมทางหลวงสำหรับการปรับปรุงดินซีเมนต์

กรมทางหลวงมีข้อกำหนดและมาตรฐานในการปรับปรุงเสถียรภาพโครงสร้างชั้นทางได้แก่ ชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base) และชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase) โดยนำมาตรฐานกรมทางหลวงในการทดสอบวัสดุมาเป็นแนวทางในการทำการทดสอบต่าง ๆ ดังสรุปในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 สรุปข้อกำหนดมาตรฐานกรมทางหลวง

ลำดับ	มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติ	ข้อกำหนดของคุณสมบัติ	มาตรฐานกรมทางหลวง		
			พื้นที่ทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ทล.ม-203/2556	พื้นที่ทางดินซีเมนต์ ทล.ม-204/2556	รองพื้นทางดินซีเมนต์ ทล.ม-206/2556
1	ทล.-ท. 213	ค่าการสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Angeles Abrasion	ไม่เกินร้อยละ 40	ไม่เกินร้อยละ 60	-
2	ทล.-ท. 205	ขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง	ตามตารางที่ 2-2	ขนาดโตสุดไม่เกิน 50 มิลลิเมตร มีส่วนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ไม่เกินร้อยละ 25	-

ลำดับ	มาตรฐาน การทดสอบ คุณสมบัติ	ข้อกำหนด ของคุณสมบัติ	มาตรฐานกรมทางหลวง		
			พื้นที่ทางพิเศษ ทล.ม-203/2556	พื้นที่ทางดินซีเมนต์ ทล.ม-204/2556	รองพื้นที่ทางดินซีเมนต์ ทล.ม-206/2556
3	ทล.-ท. 213	ความคงทน (Soundness) ของมวลรวม	ใช้เซตียมซีลเฟต จำนวน 5 รอบ แล้วไม่เกินร้อยละ 9	-	-
4	-	ส่วนละเอียด (Fine Aggregate)	ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ต้องไม่มากกว่า 2/3 ของส่วนละเอียดที่ผ่าน ตะแกรงขนาดเบอร์ 40	-	ขนาดโตสุดไม่เกิน 50 มิลลิเมตร มีส่วนผ่าน ตะแกรงเบอร์ 200 ไม่เกินร้อยละ 40
5	ทล.-ท. 102	ค่า Liquid Limit ของดิน	ไม่เกินร้อยละ 25	ไม่เกินร้อยละ 25	ไม่เกินร้อยละ 40
6	ทล.-ท. 103	ค่า Plasticity Index ของดิน	ไม่เกินร้อยละ 6	ไม่เกินร้อยละ 25	ไม่เกินร้อยละ 20
7	ทล.-ท. 108	การทดสอบค่า CBR	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ที่ความหนาแน่นแห้งของการ บดอัด	-	-

ลำดับ	มาตรฐาน การทดสอบ คุณสมบัติ	ข้อกำหนด ของคุณสมบัติ	มาตรฐานกรมทางหลวง		
			พื้นที่ทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ทล.ม-203/2556	พื้นที่ทางดินซีเมนต์ ทล.ม-204/2556	รองพื้นทางดินซีเมนต์ ทล.ม-206/2556
8	ทล.-ท. 105	กำลังรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength) ของ ดินโดยบ่มด้วยถุงพลาสติก 7 วัน จากนั้นแช่น้ำ 2 ชั่วโมงก่อน ทดสอบ	ไม่น้อยกว่า 2,413 กิโลพาสคัล (KPa)	ไม่น้อยกว่า 1,724 กิโลพาสคัล (KPa)	ไม่น้อยกว่า 689 กิโลพาสคัล (KPa)



ตารางที่ 2-2 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์

ตามมาตรฐาน ทล.ม-203/2556

ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวลรวม		
	B	C	D
50 (2 นิ้ว)	100	-	-
25.0 (1 นิ้ว)	75-95	100	100
9.50 (3/8 นิ้ว)	40-75	50-85	60-100
4.75 (เบอร์ 4)	30-60	35-65	50-85
2.00 (เบอร์ 10)	20-45	25-50	40-70
0.425 (เบอร์ 40)	15-30	15-30	25-45
0.075 (เบอร์ 200)	5-20	5-15	5-20

ถึงแม้ว่าการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์นั้นเป็นที่นิยม และสามารถเพิ่มกำลังรับแรงของดินได้ ในขณะที่เดียวกันนั้นวัสดุมีคุณสมบัติความแข็งที่เพิ่มมากขึ้นก็ส่งผลกระทบต่อความยืดหยุ่นลดลง ทำให้เกิดการแตกร้าวของชั้นทาง อีกทั้งการปรับปรุงด้วยซีเมนต์นั้นความชื้นยังส่งผลทำให้เกิดความเสียหายในโครงสร้างชั้นพื้นทาง และรองพื้นทาง ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงควรปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์

## 2.5 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยพอลิเมอร์

พอลิเมอร์นิยมใช้เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ซึ่งแต่ละประเภทจะให้คุณสมบัติที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของผู้ใช้งานซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายโดยจะแบ่ง 2 ชนิดหลักดังนี้

### 2.5.1 พอลิเมอร์ธรรมชาติ

พอลิเมอร์ธรรมชาติ หรือยางธรรมชาติ (Natural rubber) เป็นผลผลิตที่ได้จากต้นยางพารา โดยการกรีดลำต้นและนำเอาของเหลวสีขาวคล้ายน้ำนม เรียกว่า น้ำยางสดหรือน้ำยางดิบ (latex) น้ำยางสดหรือน้ำยางดิบยางธรรมชาติ (Natural Rubber) เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ประเภทไฮโดรคาร์บอน มีชื่อทางเคมีว่า “polyisoprene” โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยึด มันจึงสามารถเกิดผลึกได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น

แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความทนทานต่อการขีดสีสูง (abrasion resistance)



รูปที่ 2-5 น้ำยางสดที่ได้จากการกรีดยางพารา

โดยในปัจจุบันนั้นมีการนำยางพารามาใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในหลายด้านอาทิเช่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศาสตราจารย์ สุขประเสริฐ และคณะ (2560) มีการปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และใช้น้ำยางพาราร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เพื่อใช้สำหรับก่อสร้างชั้นพื้นทางและทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด ผลปรากฏว่า ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย น้ำยางพารามีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านตามมาตรฐานที่ ทล.-ม.204/2533 กำหนด

เอกพิสิษฐ์ บรรจงเกลี้ยง และคณะ (2016) ได้ทำการวัสดุภายนอกด้วยดินผสมยางพาราภายใต้การจำลองสภาพอากาศแบบเร่ง และเปรียบเทียบกับดินฉาบภายนอกสูตรดั้งเดิม โดยวัสดุฉาบมีส่วนผสมคือ ดินเหนียวผสม pre-vulcanized rubber ร้อยละ 10 และ Sodium Silicate ร้อยละ 3 พบว่า วัสดุฉาบภายนอกด้วยดินผสมยางพารามีความต้านทานต่อการชะล้างด้วยฝนสูงกว่าดินฉาบภายนอกสูตรดั้งเดิมอยู่มาก และการจำลองการกัดกร่อนด้วยวัฏจักรเปียกสลับแห้งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้น

กาญจนา ปิ่นวิเศษ (2560) ได้ทำถนนดินลูกรังผสมซีเมนต์และปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้นชนิร้อยละ 60 HA โดยใช้อัตราส่วนดังนี้

- ปูนซีเมนต์ร้อยละ 8 ของน้ำหนักดินลูกรัง
- ยางพาราชั้นร้อยละ 5 ของปูนซีเมนต์ และสารผสมเพิ่มร้อยละ 2 ของน้ำหนักน้ำยางพารา

เข้มข้น พบว่าตัวอย่างที่กำลังอัดหลังจากการบ่ม 7 วันผ่านตามมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์

### 2.5.2 พอลิเมอร์สังเคราะห์

เป็นผลิตภัณฑ์ที่สร้างขึ้นเพื่อเลียนแบบยางธรรมชาติ สามารถเปลี่ยนรูปได้ความเค้น และสามารถกลับคืนรูปได้โดยไม่เสียรูปอย่างถาวรสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ของสารตั้งต้นที่เป็นผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียมซึ่ง เรียกว่า “มอนอเมอร์ (monomer)” ยางสังเคราะห์แต่ละชนิดจะมีการผสมมอนอเมอร์ชนิดเดียวหรือหลายชนิดในสัดส่วนที่ต่างกัน เพื่อพัฒนาให้ได้อย่างสังเคราะห์ที่มีสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางเคมีที่แตกต่างกัน โดยในปัจจุบันนั้นก็ยังมีพอลิเมอร์สังเคราะห์หลายชนิดเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ ในด้านแตกต่างกันเช่น

- Acrylic Rubber or Polyacrylate Rubber (ACM) เป็นยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่ง ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโมโนเมอร์ของอะครีเลต (Acrylic Ester) และโมโนเมอร์ที่ว่องไว ต่อปฏิกิริยาควบรูป (Cure site Monomer) มีหลายเกรดขึ้นกับชนิดของอะครีเลตที่ใช้ในการสังเคราะห์ ยางชนิดนี้มีสมบัติทนต่อการเสื่อมสภาพนิยมใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ประเภท ยางโอริง เป็นต้น

- Acrylonitrile-Butadiene or Nitrile Rubber (NBR) ยางไนไตรล์ เป็น ยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่งซึ่งเป็นโคโพลิเมอร์ของอะครีโลไนไตรล์และบิวตาไดอีน ประกอบด้วย อะครีโลไนไตรล์ตั้งแต่ 18% - 51% ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งาน ยางไนไตรล์ เป็นยางที่มีคุณสมบัติความเป็นขั้วสูงมีสมบัติเด่น คือ ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายที่ไม่มี ขั้วต่าง ๆ ได้ดี นอกจากนี้ยังทนต่อความร้อนและต้านทานต่อการขูดถูได้ดี จึงนิยมนำไปผลิตผลิตภัณฑ์ ที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน เช่น ปะเก็นน้ำมัน ยางโอริง ยางซีล ยางเชื่อมข้อต่อ เป็นต้น

- Butadiene Rubber or Polybutadiene (BR) เป็นยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่ง ที่ผลิตจากบิวตาไดอีนโมโนเมอร์ มีความยืดหยุ่นและสมบัติการกระด้างกระดอนสูง มีสมบัติเด่น คือ ทนต่อการสึกกร่อนสูงมาก นอกจากนี้ยังมีสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำดี ความร้อนสะสมขณะใช้งาน ต่ำจึงนิยมใช้ผสมกับยางธรรมชาติหรือยางเอสปีอาร์ในการผลิตดอกยางรถยนต์หรือผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่ต้องการความทนต่อการสึกกร่อนสูง เช่น ยางพื้นรองเท้า ยางกันกระแทก เป็นต้น

- Chloroprene Rubber (CR) เป็น ยางสังเคราะห์ ที่ได้ จากโมโนเมอร์ ของคลอโรพรีน มีทั้งประเภทที่ใช้งานทั่วไปและประเภทใช้งานพิเศษ เช่น ทำกาวยาง ยางใช้เคลือบ และวัสดุอุดรอยรั่ว เป็นต้น เนื่องจากโมเลกุลของยาง CR สามารถจัดเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบ ภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสม ยางชนิดนี้จึงสามารถตกผลึกได้เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ มีค่าความทน ต่อแรงดึงสูง มีค่าความทนต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อการขูดถูสูง ยาง CR มีสมบัติทน ต่อน้ำมันได้ปานกลางถึงดี และทนต่อความร้อน แสงแดด และโอโซนได้ค่อนข้างดี

แต่ในเชิงด้านการปรับปรุงคุณภาพดินนั้นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ พอลิเมอร์สังเคราะห์ ได้แก่ พอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก (SA) และพอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) เป็นต้น ดังเช่นงานวิจัยดังนี้

## 2.6 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยพอลิเมอร์สังเคราะห์

### 2.6.1 การปรับปรุงคุณภาพดินด้านประสิทธิภาพกำลังรับแรงด้วยพอลิเมอร์สังเคราะห์

ในการปรับปรุงคุณภาพดินนั้นมีการนิยมพอลิเมอร์สังเคราะห์เพื่อใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพกำลังรับแรง อาทิเช่นงานวิจัยดังนี้

Fauziah Ahmad (2013) งานวิจัยได้ศึกษาคุณสมบัติของดินที่ปรับปรุงด้วยสไตรีนบิวตาไดอีน ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันร้อยละ 0 2.5 5 7.5 10 และ 12.5 โดยนำมาผสมกับดินประเภท Heavy Soil (MH) และทำการบ่มและทดสอบที่ 1 3 7 14 วัน โดยสามารถสรุปได้ดังนี้ ค่า Maximum dry density (MDD) นั้นจะลดลง เมื่อเพิ่มร้อยละพอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอีน ค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) นั้นจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของสไตรีนบิวตาไดอีน ผลการทดสอบแรงเฉือน (Direct Shear) นั้นมีค่าสูงสุดที่สไตรีนบิวตาไดอีนร้อยละ 2.5 และผลการทดสอบค่าความซึมน้ำ (Permeability) นั้นความพรุนภายในตัวอย่างจะน้อยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนร้อยละของสไตรีนบิวตาไดอีน

Ismail et al. (2017) งานวิจัยได้ศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรม (Short term) เพื่อหาความสัมพันธ์ในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ วัสดุที่ใช้ทดสอบ มวลรวมประเภทหินแกรนิต ซีเมนต์ประเภท 2 โดยใช้อัตราส่วนร้อยละ 4 ต่อน้ำหนักโพลีเมอร์ SBE (Tylac 4190) ใช้อัตราส่วนร้อยละ 5 ถึง 10 ต่อน้ำหนักมวลรวม โดยในงานวิจัยนั้นมีการบ่มตัวอย่างที่ 7 28 และ 60 วันมีผลการทดสอบดังนี้ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength) โดยผลการทดสอบนั้นจะได้ค่าสูงสุดที่ Tylac ร้อยละ 8 และยิ่งบ่มนานตัวอย่างจะผลส่งให้กำลังรับของตัวอย่างสูงขึ้น ผลการทดสอบ Unconfined compressive strength โดยผลการทดสอบนั้นจะได้ว่าตัวอย่าง Tylac ผสม Cement นั้นให้ strength สูงกว่าร้อยละ 97 ของวัสดุผสมซีเมนต์ ปกติ ผลการทดสอบ Resilient modulus of elasticity ผลการทดสอบนั้นจะได้ว่า strength จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น Flexural strength โดยผลการทดสอบนั้นจะได้ว่า strength จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบ (California Bearing Ratio, C.B.R) โดยผลการทดสอบนั้นจะได้ว่า ร้อยละ CBR ของตัวอย่างประเภท Soaked และ Unsoaked นั้นสูงสุดที่ซีเมนต์ร้อยละ 4 ผสม Tylac ร้อยละ 4

Ahmed (2019) การศึกษานี้เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติดินทรายด้วยพอลิเมอร์สไตรีน บิวตาไดอีน (SBR) ในอัตราส่วนร้อยละ 0 1 2 และ 3 ผลการศึกษาพบว่า ทำให้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง ผลการทดสอบ C.B.R. เพิ่มขึ้นที่พอลิเมอร์ร้อยละ 1 และ 2 เท่านั้น อีกทั้งผลกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) ค่า Cohesion ของดิน และ Angle of internal friction เพิ่มขึ้นตามอัตราพอลิเมอร์เช่นกัน

2.6.2 การปรับปรุงคุณภาพดินด้านประสิทธิภาพการทนทานความชื้นด้วยพอลิเมอร์สังเคราะห์ น้ำหรือความชื้นเป็นส่วนสำคัญที่เป็นตัวเชื่อมประสานและหุ้มเคลือบมวลดิน หากมีน้ำในปริมาณมากจะส่งผลให้เม็ดดินนั้นไม่จับตัวกัน ความแข็งแรงของดินก็จะลดลงตามความชื้นในมวลดินที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากความชื้นได้ทำลายแรงดูดของน้ำและอากาศในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ด้วยปัญหาความชื้นในมวลดินที่มีปริมาณมาก โดยส่วนใหญ่มักเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างถนนและผิวทางจราจร เช่น

- ความเสียหายแบบรอยแตกบนผิวทาง (Crack) ประเภทรอยแตกจระเข้ ดังแสดงในรูปที่ 2-6 สาเหตุเกิดจาก วัสดุโครงสร้างชั้นทางไม่ได้คุณภาพ อีกทั้งความชื้นที่สะสมในชั้นทางทำให้ ชั้นทางอ่อนตัวสูญเสียความแข็งแรงและเกิดการทรุดตัว
- ความเสียหายอันเนื่องมาจากผิวทางชำรุดจากอุทกภัย ดังแสดงในรูปที่ 2-7 สาเหตุเกิดจากเกิดน้ำท่วมขังเป็นเวลานานทำให้ผิวทางและโครงสร้างทางได้รับความเสียหาย



รูปที่ 2-6 รอยแตกบนผิวทาง (Crack) ประเภทรอยแตกจระเข้



รูปที่ 2-7 ผิวทางชำรุดจากอุทกภัย

จึงมีงานวิจัยในอดีตเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทนทานความชื้นดังนี้

A. Maghchiche (2018) การศึกษานี้ใช้โพลีเมอร์เป็นสารเพิ่มความคงตัวของดิน มีการใช้อย่างแพร่หลายในงานทางการเกษตรเพื่อควบคุมการเสื่อมสภาพของดินและควบคุมการทำให้ดินเปลี่ยนเป็นทะเลทราย และเพื่อปรับปรุงดินที่แห้งแล้งและกึ่งแห้งแล้ง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของพอลิเมอร์สังเคราะห์และไบโอโพลีเมอร์ที่ความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.03 ถึง ร้อยละ 1) ของดินแห้งแล้งและกึ่งแห้งแล้งบริเวณแอฟริกาเหนือ ผลการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ประกอบ (โพลีอะคริลาไมด์ 10 มิลลิกรัม / ลิตร และเซลลูโลส 0.5 กรัม / ลิตร) สามารถนำมาปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดินให้ดีขึ้นและเพิ่มการกักเก็บน้ำของที่ดินแห้งแล้งได้ร้อยละ 60 อีกทั้งยังเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ ป้องกันการสูญเสียน้ำโดยการระเหยและการซึมผ่านของน้ำ

Prabir K. Kolay (2016) เป็นการศึกษาผลกระทบของพอลิเมอร์เหลวชนิด Inorganic Acrylic Co-polymers ต่อคุณสมบัติของดินเม็ดละเอียด 2 ประเภทดังนี้ ดินชนิด A เป็นดินประเภท ML และดินชนิด B เป็นดินประเภท CH โดยทำการผสมพอลิเมอร์ที่ร้อยละ 2 3 4 และ 5 ของน้ำหนักแห้ง จากนั้นทำการบ่มก้อนตัวอย่างเป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน จากนั้นทำการทดสอบการหดตัวเชิงเส้น ผลการทดสอบพบว่า การหดตัวเชิงเส้นสำหรับดิน A และ B พบว่า มีค่าเป็นร้อยละ 13 และ 15 ตามลำดับ อีกทั้งเมื่อปริมาณร้อยละพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น จะไม่ส่งผลกระทบต่อตัวอย่างของดินทั้งสองชนิด

## 2.7 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

### 2.7.1 คุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวม

ตารางที่ 2-3 สรุปคุณสมบัติพื้นฐานมวลรวมที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมวัสดุงานทาง

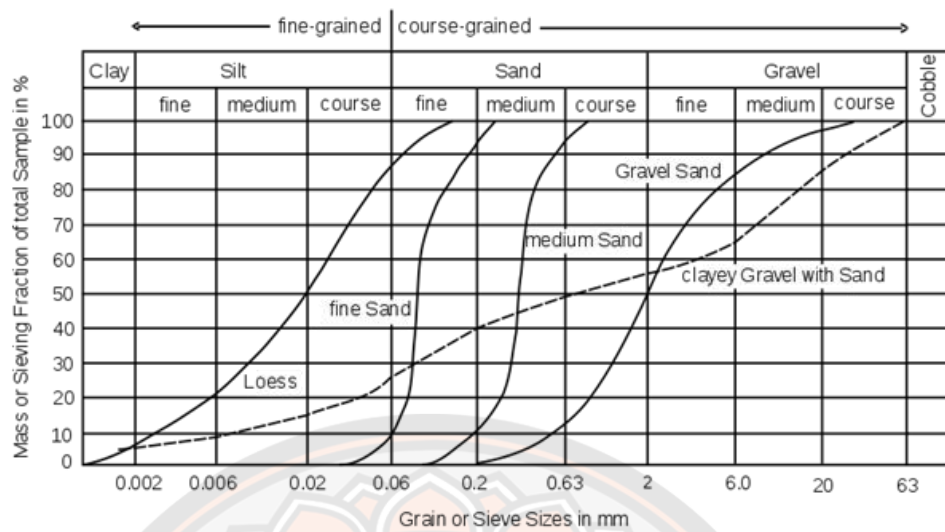
คุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวม	ผลกระทบต่อพฤติกรรมวัสดุงานทาง
1. ขนาดคละของเม็ดดิน	ขนาดคละของมวลรวมนั้นส่งผลเมื่อรูปพรุนในมวลดิน หลังจากการบดอัดแล้ว หากขนาดของเม็ดดินนั้นมีขนาดใหญ่ จะส่งผลให้เกิดรูปพรุนมากขึ้น เช่นเดียวกันหากขนาดเม็ดดินมีขนาดคละของเม็ดดินมีขนาดเล็กจะส่งผลให้เกิดรูปพรุนน้อยเช่นกัน จึงทำให้ขนาดคละเม็ดดินส่งผลกับขนาดรูปพรุนและการซึมน้ำของงานทาง

คุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวม	ผลกระทบต่อพฤติกรรมวัสดุงานทาง
2. การทดสอบหาค่าขีดความชันเหลวของดิน (Atterberg's Limit)	ปริมาณ ความชื้น หรือ ปริมาณ น้ำ ในมวลดินที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพ หากความชื้นมีปริมาณมากความแข็งแรง หรือ การรับ แรง ของ ดิน ในงานทางจะลดลง
3. การทดสอบหาค่าการสึกหรอด้วยเครื่อง (Los Angeles Abrasion)	เป็นการหาค่าความแข็งของมวลรวม โดยหาค่าน้ำหนักที่สูญเสียไป จากการขัดสีระหว่างมวลรวมและลูกเหล็ก จะบ่งบอกถึงคุณภาพของหินในการต้านการสึกกร่อนและแรงกระแทก
4. การทดสอบ California Bearing Ratio (CBR)	ที่บดอัดแล้ว เพื่อนำวัสดุดังกล่าวนำไปก่อสร้างทางสำหรับงานทาง โดยหาค่าร้อยละ CBR นั้นมากก็จะส่งผลให้การบดอัดของดินมากขึ้นเช่นกัน

#### (1) การหาขนาดเม็ดดิน (Grain Size Analysis) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D422-63

การหาขนาดและการกระจายของเม็ดดินอาจทำได้ด้วยกันหลายวิธี แต่ที่นิยมปฏิบัติกันแพร่หลาย คือ วิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) ที่มีช่องขนาดต่าง ๆ กัน มักใช้กับดินที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.075 มิลลิเมตร ขึ้นไป วิธีตกตะกอนโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์หรือหลอดดูด (Pipette) วัดการตกตะกอนเหมาะสำหรับเม็ดดินขนาด 0.2 มิลลิเมตร ถึง 0.0002 มิลลิเมตร ทั้งสองวิธีดังกล่าวอาจใช้ร่วมกันในการวิเคราะห์ขนาดของตัวอย่างเดียวกันได้

การกระจายของขนาดเม็ดดิน จะแสดงด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเม็ดในกราฟลอการิทึม (Logarithmic Scale) และเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเม็ดที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่าที่ระบุ (Percent Finer) ซึ่งเรียกว่ากราฟการกระจายของขนาดเม็ดดิน (Grain Size Distribution Curve) ดังแสดงในรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 กราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน  
(ที่มา: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sieve\\_analysis](https://en.wikipedia.org/wiki/Sieve_analysis))

#### การคำนวณ

- ร้อยละของดินที่ค้ำของดิน

$$\text{ร้อยละของดินที่ค้ำบนตะแกรง} = \frac{\text{น้ำหนักดินในแต่ละตะแกรง}}{\text{น้ำหนักดินทั้งหมด}} \times 100 \quad (2-1)$$

- ร้อยละการค้ำสะสมของดิน

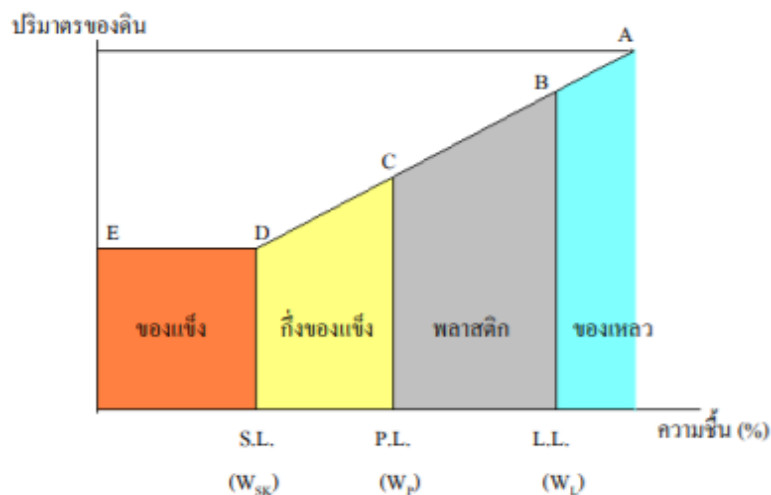
$$\text{ร้อยละการค้ำสะสม} = \text{ผลบวกสะสมของเปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้ำบนตะแกรง} \quad (2-2)$$

- ร้อยละการผ่านตะแกรงของดิน

$$\text{ร้อยละของดินที่ผ่านตะแกรง (\% Finer)} = 100 - \text{เปอร์เซ็นต์ค้ำสะสม} \quad (2-3)$$



## (2) การทดสอบหาค่าขีดความชื้นเหลวของดิน (Atterberg's Limit) ASTM D 4318-93



รูปที่ 2-9 กราฟแสดงสถานะของดิน

(ที่มา : <http://krumanit.cmtc.ac.th/main/images/stories/4.pdf>)

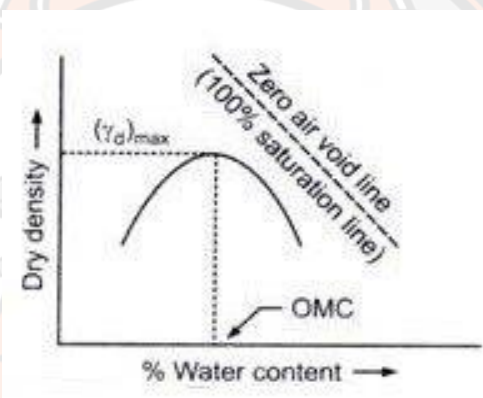
จากรูปที่ 2-9 จุดเปลี่ยนสถานะของดิน มีอิทธิพลมาจากความชื้นหรือปริมาณน้ำในตัวอย่างดิน ซึ่งเป็นข้อมูลที่ใช้ประกอบการคาดคะเนสมบัติทางวิศวกรรม และใช้เป็นข้อมูลเพื่อจำแนกประเภทของดินประกอบ

- ขีดความชื้นเหลวของดิน (Liquid Limit, L.L.) คือ ความชื้นในมวลดินที่จะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นรูปของพลาสติก
- ขีดความเหนียวของดิน (Plastic limit, P.L.) คือ ความชื้นในมวลดินที่จะเปลี่ยนสถานะจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็ง
- ขีดหดตัวของดิน (Shrinkage Limit) คือ ความชื้นในมวลดินที่จะเปลี่ยนสถานะจากกึ่งของแข็งเป็นของแข็ง
- ดัชนีความเหนียวของดิน (Plasticity Index, P.I.) คือ ค่าผลต่างของขีดความชื้นเหลวของดิน กับขีดความเหนียวของดิน แสดงถึงความไวต่อการเปลี่ยนสถานะของดิน

### (3) การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Proctor Test)

ทดสอบตามมาตรฐาน ทล. - ท. 108/2517 (เทียบเท่า AASHTO T 180)

ในการทำการบดอัดในห้องปฏิบัติการ จะใช้เป็นมาตรฐานในการควบคุมการบดอัดในสนาม จะทำได้โดยการนำเอาวัสดุที่จะใช้บดอัดในสนามเข้ามาฝั่งให้แห้งเพื่อให้อยู่ในสภาวะแห้ง จากนั้นแล้วค่อยๆ เพิ่มน้ำเข้าไปจนถึงปริมาณที่พอเหมาะแล้วเริ่มทำการบดอัดในแบบที่ใช้บดอัด (Mold) เมื่อซังน้ำหนักเพื่อคำนวณหาความหนาแน่น ทำการเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นเรื่อย ๆ อย่างน้อย 4 ถึง 6 ครั้ง เพื่อหาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของดินแห้งกับความชื้น โดยกราฟจะปรากฏเป็นเส้นโค้งขึ้นมีจุดยอด ซึ่งเรียกว่า “ความหนาแน่นสูงสุด” (Maximum Dry Density, MDD) และความชื้นที่จุดนั้นเรียกว่า “ความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด” (Optimum Water Content, OMC) ดังแสดงในรูปที่ 2-10



รูปที่ 2-10 เส้นโค้งการบดอัดของดิน

(ที่มา: <https://theconstructor.org/geotechnical/soil-maximum-dry-density-optimum>)

### การคำนวณค่าน้ำหนักรวมต่อหน่วยปริมาตร (Total Unit Weight)

$$1. \text{ Wet Density ของดิน} = \frac{\text{Wet Weight}}{\text{Volume of mold}} \text{ lb. /cu. ft.} \quad (2-4)$$

$$2. \text{ Dry Density ของดิน} = \frac{W}{V(1+w)} \text{ lb. /cu. ft.} \quad (2-5)$$

เมื่อ:

W = น้ำหนักดิน (Wet weight) ใน mold

V = ปริมาตรของ mold

w = เปอร์เซ็นต์ความชื้นของดิน (water content)

## (4) การทดสอบ California Bearing Ratio ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1883 – 67



รูปที่ 2-11 การทดสอบ California Bearing Ratio

วิธีการทดสอบกำลังในการรับน้ำหนักของดินหลังบดอัด โดยการใช้ท่อนเหล็กกลมตัน (Piston) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว กดลงบนตัวอย่างที่เตรียมไว้ด้วย อัตราความเร็ว 0.05 นิ้วต่อนาที ดังรูปที่ 2-11 จากนั้นนำไปหาอัตราส่วนเปรียบเทียบกับค่า Unit load มาตรฐานที่ได้จากการทดลองกด piston ขนาดเดียวกันนี้บนตัวอย่างที่บดอัดที่ความลึกต่าง ๆ ของ penetration เท่ากัน ค่าที่ได้นี้เรียกว่า ร้อยละ C.B.R. เทียบอัตราส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ของ Standard Unit load เขียนเป็นสมการของอัตราส่วนได้ดังนี้

$$\text{CBR} = \frac{\text{Test unit load}}{\text{Standard unit load}} \times 100\% \quad (2-6)$$

ค่า standard unit load เพื่อใช้ในการทดสอบนั้นสามารถน้ำหนักตามมาตรฐานที่กระทำกับตัวอย่างดังตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-4 ค่า standard unit load ที่ความลึกต่าง ๆ

Penetration (in)	Unit load (Psi)
0.1	1000
0.2	1500
0.3	1900
0.4	2300
0.5	2600

จากผลการทดสอบผลร้อยละ C.B.R ของดินจะนำพิจารณาคุณสมบัติของดินในการใช้งานในงานก่อสร้างถนนในชั้นดินถม ชั้นรองพื้นทาง (subbase) หรือชั้นพื้นทาง (base) ดังตารางที่ 2-8

ตารางที่ 2-5 เปรียบเทียบร้อยละ CBR กับลักษณะการใช้งานทางวิศวกรรม

% CBR	คุณสมบัติเหมาะสมทางวิศวกรรม	การใช้งาน
0 - 3	Very poor	Subgrade
3 - 7	Poor to fair	Subgrade
7 - 20	Fair	Subgrade
20 - 50	Good	Subgrade, base
50 - 80	Very	Good base
>80	Excellent	Base

### 2.7.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรม

(1) การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test, UCS) ตามมาตรฐาน ทล.ท 105/2517



รูปที่ 2-12 การทดสอบแรงอัดแกนเดียว

การหาค่ากำลังต้านทานต่อแรงกดสูงสุดของเนื้อดินโดยไม่มีแรงดันด้านข้างจากที่กระทำกับตัวอย่างดินรูปทรงกระบอกจนกระทั่งดินวิบัติจากนั้นสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) โดยค่าความเค้นสูงสุดนั้นเรียกว่า (Unconfined Compressive Strength ,  $q_u$ )

### การคำนวณ

- คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนไปในระหว่างการทดสอบ

$$A_c = \frac{A}{(1-\epsilon)} \quad (2-7)$$

- คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนไปในระหว่างการทดสอบ

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2-8)$$

เมื่อ

L = การทรุดตัวในแนวดิ่งของแท่งตัวอย่างที่น้ำหนักกดใด ๆ อ่านได้จากมาตรวัด

$\epsilon$  = ความเครียดตามแนวดิ่งที่น้ำหนักกดใด ๆ

$L_0$  = ความยาวเดิมของแท่งตัวอย่าง

A = พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่าง

- คำนวณหาหน่วยแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (Stress) สำหรับน้ำหนักกดใด ๆ

$$\sigma_c = \frac{P}{A_c} \quad (2-9)$$

เมื่อ

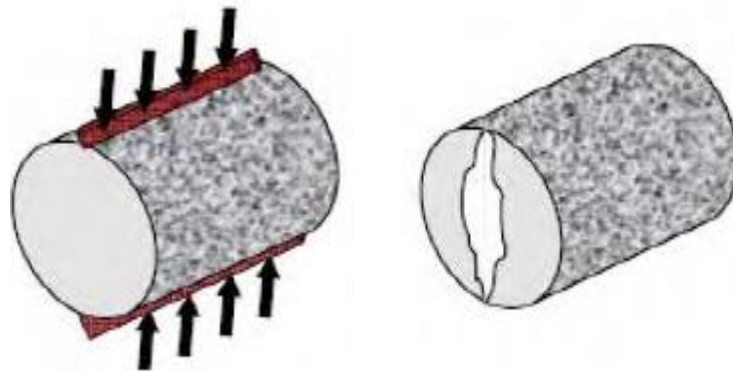
P = น้ำหนักกด

$A_c$  = พื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนไป

### (2) การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) ตามมาตรฐาน

#### ASTM D6931-17

การใช้วิธีแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile) หมายถึง การทดสอบโดยให้แรงกระทำกับก้อนตัวอย่างในขนานตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างตามแนวดิ่ง จะทำให้ก้อนตัวอย่างเกิดการขยายตัวในแนวราบและเกิดการวิบัติ ดังแสดงในรูป 2-13 โดยประยุกต์มาจากการทดสอบก้อนแอสฟัลต์คอนกรีตกับการทดสอบมวลรวมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์



(ก) แรงอัดกระทำบนก้อนตัวอย่าง (ข) ก้อนตัวอย่างเกิดการเสียหาย  
รูปที่ 2-13 การให้น้ำหนักกระทำต่อก้อนตัวอย่างและลักษณะการแตกร้าวก้อนตัวอย่าง  
(ที่มา: สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนากรมทางหลวงชนบท  
และคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

- ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่เกิดขึ้นกับก้อนตัวอย่าง ในการทดสอบหาได้จากสมการที่ 2-10 ดังนี้

$$\sigma_T = \frac{2P}{\pi DT} \quad (2-10)$$

เมื่อ

$\sigma_T$	=	Tension stress
P	=	น้ำหนักที่กระทำต่อก้อนตัวอย่าง (N)
T	=	ความสูงเฉลี่ยของตัวอย่าง (mm)
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง (mm)

อีกทั้งสามารถคำนวณอัตราส่วนร้อยละค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม ในสภาวะของก้อนตัวอย่างได้รับความเสียหายจากความชื้น โดยการประยุกต์การทดสอบจากมาตรฐานการหาความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทยของกรมทางหลวงตามมาตรฐานการทดสอบ ทล.-ท. 413/2544 จากสมการที่ 2-11 ดังนี้

$$\text{Tensile Strength Ratio, \%} = \frac{\text{Indirect Tensile strength of soaked specimens}}{\text{Indirect Tensile strength of Unsoaked specimens}} \times 100 \quad (2-11)$$

โดยการหาอัตราส่วนกำลังรับแรงดึงทางอ้อม หาได้จากตัวอย่าง 2 ประเภทคือ

1. กลุ่มก้อนตัวอย่างที่แช่ในน้ำ (Soaked specimens)
2. กลุ่มก้อนตัวอย่างที่ไม่ได้แช่ในน้ำ (Unsoaked specimens)

**(3) การทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Dynamic Creep Test) ตามมาตรฐาน AS 2891.12.1 (Standards Association of Australia)**

การคืบ (Creep) คือการที่วัสดุได้รับแรงจากภายนอกมากระทำระยะเวลานาน และมีค่าต่ำกว่าจุดคราก (Yield point) โดยจะส่งผลให้วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรจนเกิดการวิบัติ

**การทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร** เป็นศึกษาผลกระทบการคืบของวัสดุ โดยมีแรงกระทำขนาดเล็ก กระทำในช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลา



รูปที่ 2-14 การทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร

ปกติการทดสอบนี้จะใช้กับก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์มาตรฐาน AS 2891.12.1 ในการทดสอบมวลรวมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ เป็นการศึกษการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (Permanent deformation) โดยจะให้น้ำหนักกระทำกับก้อนตัวอย่างตามแนวแกน (Axial Load) ในลักษณะกระทำซ้ำต่อก้อนตัวอย่าง จากมาตรฐาน AS 2891.12.1 ดังแสดงในรูป 2-14 มีรูปแบบการกระทำซ้ำ (Dynamic Load) เท่ากับ 200 กิโลปาสคาล (KPa) แบ่งเป็นช่วงเวลาที่แรงกระทำเท่ากับ 0.5 วินาที และเวลาพัก 1.5 วินาที จากนั้นให้น้ำหนักกับก้อนไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งก้อนตัวอย่างวิบัติ หรือจนกว่าจำนวนรอบเท่ากับ 10,000 รอบ

### 2.7.3 คุณสมบัติผลกระทบของความชื้น

จากการศึกษาและค้นคว้าการทดสอบความชื้นในมวลดิน มีการพัฒนาการทดสอบเพื่อจำลอง และการเปรียบเทียบสภาพความเสียหายของความชื้นที่ส่งผลกระทบต่อดินในด้านต่าง ๆ โดยยกตัวอย่างวิธีการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 2-6 การจำลองความเสียหายของวัสดุ

คุณสมบัติของวัสดุ	วิธีการทดสอบ
<b>การจำลองจากผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Environmental Model)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>กำลังรับแรง (Strength)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>การทดสอบการแข็งตัว-ละลายของน้ำ (Freeze-thaw cycling)</li> <li>การทดสอบเปียก-แห้ง (Wet-dry cycling)</li> </ul> <p>เพื่อจำลองสภาพการรับแรงของตัวอย่างขณะอยู่ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้น เพื่อวิเคราะห์กำลังของวัสดุเมื่อได้รับผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม</p>
<b>การจำลองความเครียดแบบ Top-Down Compressive Fatigue-Erosion</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>กำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>การทดสอบ Cyclic impact erosion</li> </ul> <div style="text-align: center;"> <p>(a) Load Case      (b) Unload Case</p> </div> <p>รูปที่ 2-15 การทดสอบ Cyclic impact erosion ที่มา : Board et al. (2014)</p> <p>เป็นการจำลองโดยทำการให้แรงบีบอัดบริเวณด้านบน และด้านล่าง ขณะที่ตัวอย่างนั้นอยู่ในน้ำ ซึ่งจะเกิดการสึกกร่อนของตัวอย่าง เป็นการจำลองความล้าที่เกิดจากน้ำหนักของปริมาณการจราจรที่ส่งผลต่อความอ่อนแอของชั้นดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ เพื่อวิเคราะห์ ความเค้นเฉือน ความล้า และ โมดูลัสที่ลดลง</p>



คุณสมบัติของวัสดุ	วิธีการทดสอบ
<b>การจำลองความเครียดแบบ การแตกเนื่องจากการหดตัว (Shrinkage Cracking)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• การหดตัวแบบแห้งสูงสุด (Ultimate drying shrinkage strain)</li> <li>• ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of thermal expansion)</li> <li>• สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of friction)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• การทดสอบ Restrained shrinkage cracking test</li> </ul> <div data-bbox="906 533 1332 853" style="text-align: center;"> </div> <p style="text-align: center;">รูปที่ 2-16 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ที่มา : Board et al. (2014)</p> <p>เป็นการทดสอบที่จำลองการเกิดความเครียดในตัวอย่างเนื่องจากการทดสอบสัมประสิทธิ์หดตัวและการขยายสูงสุด เมื่อมีผลกระทบทางความร้อนสามารถจำลองตัวอย่างในภาคสนามที่อยู่สภาพอากาศที่มีอุณหภูมิสูงโดยทำการติดตั้ง (LVDT) บริเวณด้านบนของตัวอย่างเพื่อวัดการหดและขยายตัว หลังจากทำการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 56 วัน เป็นต้น</p>

จากการสรุปการทดสอบที่กล่าวมาในข้างต้นนั้น ผู้จัดทำนั้นได้ทำการเลือกทดสอบด้วย 2 วิธี ดังนี้คือ การทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดินตามมาตรฐาน AS 1141.53 และ การทดสอบความทนทานโดยวิธีเปียกสลับแห้งตามมาตรฐาน ASTM D559 เนื่องจากมีขั้นตอนการทดสอบที่ง่ายไม่ซับซ้อนยุ่งยาก อีกทั้งไม่ต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบที่มีราคาแพง สามารถประยุกต์ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีในห้องปฏิบัติการเพื่อใช้สำหรับการทดสอบได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) การทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดิน (Capillary Rise Test) ตามมาตรฐาน AS 1141.53 (Standards Association of Australia)



รูปที่ 2-17 การดูดซึมน้ำในมวลดิน

เป็นการทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดินซึ่งทำการวัดด้วยเทียบกับระยะเวลา 72 ชั่วโมง โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อตัวอย่างอาจมีได้หลายอย่างเช่น ประเภทดิน และรูพรุนภายในก้อนตัวอย่าง โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

**คำนวณการดูดซึมน้ำในมวลดิน (Capillary rise test, CR%)**

$$CR, \% = \left( \frac{\text{ความสูงของน้ำที่ดูดซึม ณ เวลานั้น}}{\text{ความสูงทั้งก้อนตัวอย่าง}} \right) \times 100 \quad (2-12)$$

กัญจน์ สลิ่งศ์ (2020) การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้อยมาตรฐานด้วยวัสดุผสมซีเมนต์โพลีเมอร์ เป็นการนำดินลูกรังด้อยมาตรฐานผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 และโพลีเมอร์ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน โดยทำการแทนที่ซีเมนต์โพลีเมอร์ที่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 ตามลำดับจากนั้นบ่มตัวอย่างที่เวลา 7 และ 28 วัน จากนั้นทำการทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดินพบว่า อัตราการดูดซึมน้ำสูงสุดอยู่ที่วัสดุเชื่อมประสานร้อยละ 2 อีกทั้งพบว่าดินลูกรังปกตินั้นจะมีการดูดซึมน้ำโดยใช้ระยะเวลาเพียง 20 ถึง 30 นาทีหลังจากนั้นก้อนตัวอย่างพังทลาย จึงสรุปได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้อยมาตรฐานด้วยวัสดุผสมซีเมนต์โพลีเมอร์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันความชื้นของดินซีเมนต์

(2) การทดสอบความทนทาน (Durability Test) โดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wetting and drying) ตามมาตรฐาน ASTM D559



รูปที่ 2-18 การทดสอบความทนทาน (Durability Test)

คำนวณร้อยละความสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง

$$\text{Soil retain, \%} = 100 - \left( \frac{\text{น้ำหนักเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักสุดท้าย}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \right) \times 100 \quad (2-13)$$

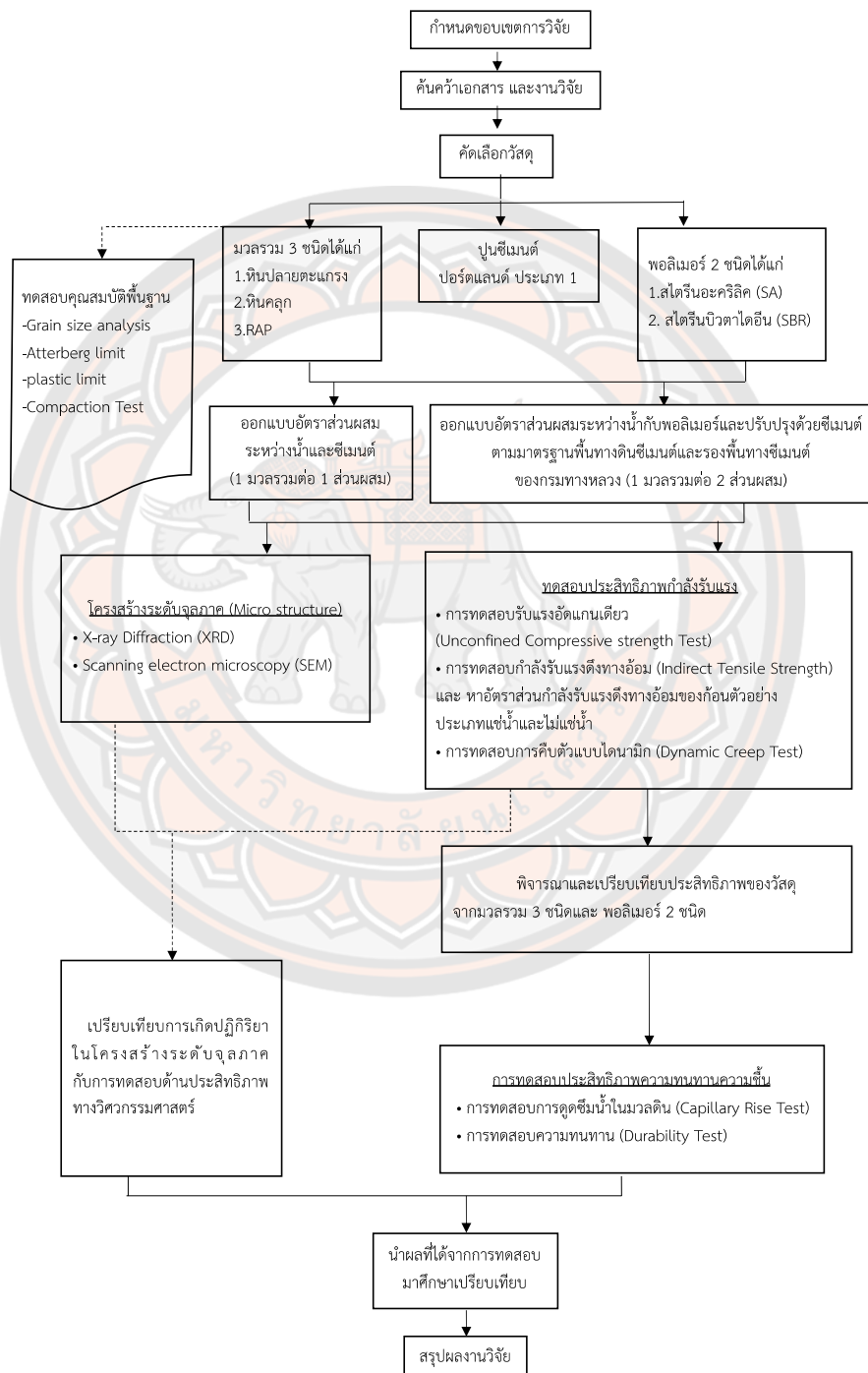
Jirayut Suebsuk and Agakaradate Siriphan (2017) การปรับปรุงดินลูกรังผสมซีเมนต์ และได้ทำการทดสอบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง ต่อกำลังรับแรงของชั้นพื้นทางดินลูกรังปรับปรุงด้วยซีเมนต์ร้อยละ 1 และ 5 จากผลการทดสอบ สรุปได้ว่า ดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัดนั้นมีค่าความแกร่งสูงขึ้น และค่าความเครียดที่จุดวิบัติมีค่าต่ำตามรอบการทดสอบเปียกสลับแห้งจนถึงรอบที่ 6 จนถึงรอบที่ 12 หลังจากนั้นความแกร่งและกำลังอัดมีแนวโน้มลดต่ำลง

## 2.8 บทสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวรรณกรรมของงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศนั้น จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพมวลรวมนั้นมีหลายวิธีอาทิเช่น การปรับปรุงด้วยเถ้าลอย ปูนขาว เป็นต้น ส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นในการปรับปรุงคุณภาพของมวลรวมให้มีข้อดีด้านวิศวกรรม โดยส่วนมากนั้นนิยมปรับปรุงประสิทธิภาพในการรับแรงของวัสดุเพียงอย่างเดียว ซึ่งการทดสอบเกี่ยวกับความคงทนจากผลกระทบของความชื้นนั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลาย เนื่องจากวิธีการทดสอบยังไม่สามารถจำลองสภาพความเสียหายได้ใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริงของถนนเช่น การอยู่ในสภาวะน้ำท่วม สลับกับการแปรปรวนของความชื้น รวมไปถึงอากาศร้อนจัด จึงทำให้การปรับปรุงด้วยวิธีข้างต้นที่มุ่งเน้นเพียงการศึกษาในด้านกำลังรับน้ำหนักเพียงอย่างเดียว นั้น ยังคงพบข้อเสียในเรื่องผลกระทบของความชื้นต่อโครงสร้างถนน ส่งผลให้เกิดความเสียหาย อาทิเช่นการหลุดตัว การพังของถนน การแตกร้าวของผิวถนน เป็นต้น จากปัญหาดังกล่าวนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าเพื่อปรับปรุงคุณภาพของมวลรวมให้มีประสิทธิภาพทางวิศวกรรมที่ดีขึ้น และประสิทธิภาพความคงทนจากผลกระทบของความชื้นด้วยการนำแนวคิดการใช้พอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก (SA) และพอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอิน (SBR) ที่สามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด และนิยมใช้แก้ปัญหาในด้านความชื้น การรั่วซึม และเพิ่มการกันน้ำของคอนกรีต ด้วยการนำพอลิเมอร์ดังกล่าวมาปรับปรุงคุณภาพมวลรวม จากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพในด้านต่าง ๆ เช่น การวิเคราะห์ลักษณะพฤติกรรมของโครงสร้างในระดับจุลภาค การทดสอบกำลังของวัสดุงานทางตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง และทดสอบเกี่ยวกับประสิทธิภาพการทนทานความชื้นจากแนวคิดการศึกษางานวิจัยในอดีต โดยทำการทดสอบดังนี้ การทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดิน (Capillary Rise Test) และการทดสอบความทนทาน (Durability Test) โดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wetting and drying) ซึ่งได้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการดำเนินงานในลำดับถัดไป

## บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

### 3.1 แผนผังวิธีการดำเนินงาน



รูปที่ 3-1 แผนการดำเนินงานวิจัย

### 3.2 การคัดเลือกวัสดุ

ผู้วิจัยได้คัดเลือกวัสดุมวลรวม และพอลิเมอร์ที่ใช้ในการปรับปรุง สำหรับในการศึกษา งานวิจัยดังนี้

- (1) มวลรวมจำนวน 2 แหล่ง โดยใช้วัสดุมวลรวมทั้งหมด 3 ชนิดได้แก่
  - ดินปลายตะแกรง และ หินคลุก จากโรงโม่หินศิลาพัฒนา จ.สุโขทัย
  - วัสดุผิวทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP)
- (2) พอลิเมอร์ 2 ชนิดได้แก่ พอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก (SA) และ พอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอีน (SBR)
- (3) ปูนซีเมนต์ ปอร์แลนด์ประเภท 1

#### 3.2.1 มวลรวม

- (1) ดินปลายตะแกรง (Quarry by Product)

วัสดุที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมโรงโม่หิน ลักษณะคล้ายหินคลุกแต่มีดินปะปนอยู่มากและไม่มีการคัดแยกขนาดของเม็ดวัสดุ ซึ่งเป็นหินที่ด้อยคุณภาพส่วนใหญ่นิยมนำมาใช้ในการถมที่ได้จากกระบวนการระเบิดหิน จากนั้นจะถูกลำเลียงมาเพื่อนำหินสู่ปากโม่ (เครื่องย่อยวัสดุ ชั้นที่ 1) จากนั้นจะถูกลำเลียงเพื่อคัดแยกดินและหินออกจากกันด้วยตะแกรง Grizzly Feeder โดยวัสดุที่ผ่านดังกล่าวคือดินปลายตะแกรง



รูปที่ 3-2 ดินปลายตะแกรง

## (2) หินคลุก (Crushed rock)



รูปที่ 3-3 หินคลุก

หินคลุกเป็นวัสดุที่ได้จากการระเบิดหินซึ่งจะทำการย่อยหินในโรงโม่หิน ชนิดของหินพบได้มากมีอยู่ 3 ชนิด เมื่อจำแนกตามหินต้นกำเนิด ได้แก่ หินปูน (Limestone) หินแกรนิต (Granite) และหินบะซอลต์ โดยในงานนี้ได้ใช้หินปูน จากโรงโม่หินศิลาพัฒนา จังหวัดสุโขทัย ส่วนมากนิยมใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง โดยมีขนาดแตกต่างกัน มีหลายเกรดแล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งาน ไม่เหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นหินก่อสร้างหรือบดเป็นปูนซีเมนต์ ส่วนใหญ่จึงนิยมนำใช้ถมถนนร่วมกับหินลูกรัง หรือนำไปทำเป็นอิฐบล็อก

## (3) วัสดุผิวทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP)



รูปที่ 3-4 วัสดุผิวทางเก่า

วัสดุผิวทางเก่าเป็นวัสดุที่ได้จากการรื้อหรือตัดชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถเลือกใช้ได้ 3 วิธี ตามลักษณะของเครื่องจักรที่ใช้ดังนี้

ก. การตัดโดยวิธี Ripping ที่ขุดเอาชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเดิม โดยไม่ให้มีวัสดุชั้นพื้นทางที่ไม่ใช่พื้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตติดขึ้นมาด้วยซึ่งวิธีนี้ ก่อนนำไปทำ Stock Pile ต้องทำการย่อย (Crushing) กำจัดวัสดุไม่พึงประสงค์ และคัดขนาดให้ได้ตามที่ต้องการเสียก่อน



รูปที่ 3-5 การรื้อหรือตัดชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเดิมโดยวิธี Ripping  
ที่มา: สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ (2555)

ข. การตัดผิวทางแบบเย็น (Cold Milling) วิธีนี้ต้องมีกระบวนการคัดส่วนที่ไม่เหมาะสมออกด้วยเนื่องจากเครื่องตัดผิวทางแบบเย็นนี้จะตัดผิวเม็ดหินทำให้ Gradation ของชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเดิมมีการเปลี่ยนแปลง เช่นมีปริมาณฝุ่นสูงขึ้น



รูปที่ 3-6 การรื้อหรือตัดชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเดิมแบบเย็น (Cold Milling)  
ที่มา : สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ (2555)

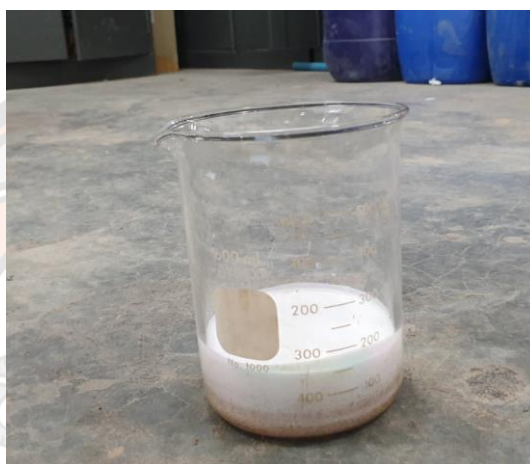
ค. การตัดผิวทางแบบร้อน (Hot Milling) โดยใช้เครื่องจักรตัดผิวทางแบบตัดร้อน (Heater Planer) ที่มีอุปกรณ์ให้ความร้อนผิวทางเดิม และอุปกรณ์ตัดผิววิธีนี้จะมีข้อ



ได้เปรียบคือ ไม่ทำให้ขนาดคละของชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเดิมเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการให้ความร้อน จะทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเดิม มีลักษณะร่วนแบบ Hot-Mix ปกติทั่วไปสามารถรื้อหรือตัดได้โดยง่าย

### 3.2.2 พอลิเมอร์

#### (1) พอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก (SA)



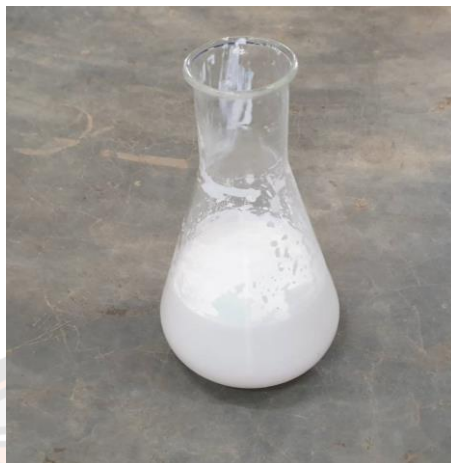
รูปที่ 3-7 พอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก (SA)

พอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก เป็นโคพอลิเมอร์ (Copolymer) แบบชนิดน้ำ มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นเนื่องจากแอมโมเนียเป็นที่นิยมมาใช้ในเชิงอุตสาหกรรมในการก่อสร้าง เช่น งานอาคาร หลังคา อีกทั้งนำมาผสมกับปูนซีเมนต์คุณสมบัติการยึดเกาะ มีความยืดหยุ่นสูง และเพิ่มประสิทธิภาพในการกั้นน้ำบนพื้นผิว

ตารางที่ 3-3-1 คุณสมบัติของพอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก (SA)

Typical properties	Typical Value
Solid content%	46
pH	10
Particle size (micron)	0.17
Brookfield viscosity	< 100
Glass transition temperature (degree C)	14

## (2) พอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอีน (SBR)



รูปที่ 3-8 พอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอีน (SBR)

เป็นยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่งซึ่งผลิตโดยการเตรียมโคโพลิเมอร์ระหว่างสไตรีนและบิวตาไดอีนด้วยวิธีโพลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) มีชื่อเรียกว่า Buna-S (สมัยสงครามโลกครั้งที่ 1) และ GR-S (สมัยสงครามโลกครั้งที่ 2) เป็นยางที่ใช้ในงานทั่วไป ราคาไม่แพง มีหลายเกรดขึ้นกับกระบวนการสังเคราะห์ ยางเอสปีอาร์เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติจะมีคุณภาพสม่าเสมอกว่า มีสิ่งเจือปนน้อยกว่า และที่สำคัญคือ ไม่ต้องบดยางให้นิ่มก่อนทำการผสมเคมีเนื่องจากยางชนิดนี้ถูกสังเคราะห์มาให้มีน้ำหนักโมเลกุลที่ไม่สูงมากนัก จึงมีความหนืดที่เหมาะสมทำให้สารเคมีกระจายตัวได้ดี ไหลได้ง่ายในระหว่างการขึ้นรูป มีแนวโน้มที่จะเกิดยางตายในระหว่างกระบวนการผลิตน้อยกว่า มีอัตราเร็วในการคงรูปช้ากว่าและถูกออกซิไดซ์ได้ช้ากว่ายางธรรมชาติ ทำให้สามารถผสมยางในเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิสูงกว่าได้ แม้ว่ายางเอสปีอาร์จะมีค่าความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดต่ำกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากไม่สามารถเกิดการตกผลึกได้เมื่อถูกยืด แต่ถ้ามีการเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็สามารถทำให้ค่าดังกล่าวสูงใกล้เคียงหรือต่ำกว่ายางธรรมชาติเพียงเล็กน้อย สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น การผลิตสายพาน พื้นรองเท้า ฉนวนหุ้มสายไฟ และส่วนมากจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยางล้อยานพาหนะขนาดเล็กโดยใช้ผสมกับยางชนิดอื่น ๆ เช่น ยางธรรมชาติ ยางบิวตาไดอีน

ตารางที่ 3-2 พอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอีน (SBR)

Typical properties	Typical Value
Solid content %	45 - 47.0
pH	8.5 – 11.0
Particle size (micron)	0.16 – 0.18
Stabilizer type	anionic
Glass transition temperature (C °)	+8

### 3.3 การทดสอบคุณสมบัติวัสดุรวม

งานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบเกี่ยวกับองค์ประกอบเชิงเคมี ลักษณะโครงสร้างในมวลรวม (Micro Characteristics) และคุณสมบัติทางวิศวกรรมประกอบดังนี้

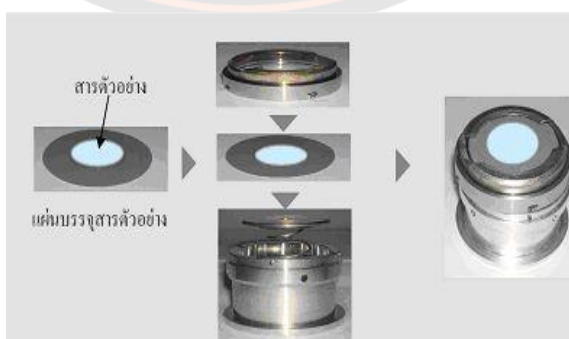
#### • การทดสอบองค์ประกอบเคมี

##### 3.3.1 X-ray Diffraction (XRD)

เป็นการศึกษาองค์ประกอบแร่ของมวลรวม XRD เป็นเทคนิคที่วิเคราะห์เอกลักษณ์ของการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึก โดยใช้การคำนวณจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray)

#### ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

1. นำดินมาบดให้ละเอียด
2. ใส่สารตัวอย่างในภาชนะสำหรับใส่สารตัวอย่าง เกลี่ยให้ทั่วให้ผิวของตัวอย่างเรียบและเสมอกับขอบของแผ่นที่บรรจุ นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ไปใส่ที่ตำแหน่งตัวอย่างของเครื่อง XRD ดังรูป 3-9



รูปที่ 3-9 แสดงการเตรียมตัวอย่าง X-ray Diffraction (XRD)

(ที่มา : <https://nuc2010.wordpress.com/2010/04/01/>)

### ขั้นตอนการวัดตัวอย่างและวิเคราะห์ข้อมูล

1. เครื่อง XRD ถูกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์และโปรแกรมเฉพาะทาง
2. ตั้งค่ามุมที่ต้องการวัดสารตัวอย่าง (10-60 องศา)
3. สั่งให้เครื่องมีอวัดสารตัวอย่าง
4. วิเคราะห์ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่าง

### 3.3.2 Scanning electron microscopy (SEM)

#### ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

ลักษณะตัวอย่างที่ทำการทดสอบ:

- ปริมาณตัวอย่างที่ต้องเตรียมเพื่อทำการวิเคราะห์ หากเป็นแบบผง ใช้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น
- หากเป็นของแข็ง ควรเตรียมมาโดยมีขนาดไม่เกิน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรแล้วแต่ภาชนะ

ที่รองรับดังนี้

(1) ถ้าชิ้นงานตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าอาจต้องมีการเคลือบผิวตัวอย่างด้วยทองหรือคาร์บอนขนาดเล็กและที่ฝังตัวอย่างนำไปตะแ่งพร้อมกับการกลึงบนสตั๊บ (stub)

(2) ตัวอย่างที่เป็นของแข็งควรวางให้มั่นคง อาจเพิ่มการนำไฟฟ้าโดยติดเทปโลหะหรือคาร์บอนบนตัวอย่างแล้ว ลากลงมาที่ตัวสตั๊บ (stub) การติดเทปที่ด้านบนบนให้แน่นหนาจะทำให้ภาพถ่ายที่กำลังขยายสูงมีความชัดเจนมากขึ้น

(3) นำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ

#### • คุณสมบัติทางวิศวกรรม

### 3.3.4 การทดสอบหาขนาดคละของมวลรวมโดยการร่อนผ่านตะแกรง

(Sieve Analysis) แบบล้างตามมาตรฐานวิธีการทดสอบกรมทางหลวงที่ ทล. -ท.205/2517



รูปที่ 3-10 การหาขนาดคละของมวลรวมโดยการร่อนผ่านตะแกรง

1) หากก้อนวัสดุติดกันเป็นก้อน ให้นำวัสดุแยกจากกันให้หมดแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส เพื่อหาความชื้นของตัวอย่างเพื่อคำนวณหามวลตัวอย่างแห้ง นำตัวอย่างไปแช่น้ำทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง ในกรณีที่ใช้เครื่องเขย่าดังรูปที่ 3-10 หากไม่ใช่เครื่องเขย่าควรแช่ไว้ประมาณ 3 ถึง 4 ชั่วโมง จากนั้นทำการเทตัวอย่างลงบนตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร) ใช้น้ำล้างจนกว่าไม่มีวัสดุผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แล้วจึงนำตัวอย่างที่อยู่บนตะแกรงเบอร์ 200 ไปอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส

2) นำตัวอย่างไปร่อนผ่านตะแกรงขนาดต่าง ๆ ตามต้องการ ใช้เวลาประมาณ 15 นาที และนำตัวอย่างที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาดไปทำการคำนวณ

### 3.3.5 การทดสอบค่าขีดความชื้นเหลวของดิน Liquid Limits

ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบกรมทางหลวงที่ ทล.-ท. 102/2515

#### วิธีการทดสอบ

- 1) นำตัวอย่างร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (0.425 มิลลิเมตร) ใช้น้ำหนักประมาณ 300 กรัม
- 2) นำตัวอย่างที่ได้มาผสมกับน้ำ ประมาณ 15 ถึง 20 มิลลิลิตร ผสมจนกระทั่งดินและน้ำผสมกันมีลักษณะคล้ายปูนฉาบดังแสดงในรูป 3-11



รูปที่ 3-11 การทดสอบค่า Liquid Limits

- 3) นำตัวอย่างดินใส่ถ้วยทองเหลือง หลังจากนั้นใช้มีดปาด (Spatula) ตัวอย่างดินบริเวณตรงกลางถ้วยทองเหลืองมีความหนาประมาณ 10 มิลลิเมตร

4) บากตัวอย่างดินด้วยเครื่องมือบาก (Grooving tool) ให้เป็นตรงกลางดังรูป 3-26 ทำการเคาะถ้วยทองเหลืองด้วยความเร็วสม่ำเสมอ (2 ครั้ง/วินาที) จนกระทั่งดินบริเวณรอยบากเคลื่อนที่เข้าบรรจบกัน 1 เซนติเมตร แล้วจดบันทึกจำนวนครั้งของการเคาะ

5) ทำการทดลองทั้งหมด 4 จุด

จุดที่ 1 ช่วงการเคาะ 35 – 40 ครั้ง

จุดที่ 2 ช่วงการเคาะ 25 – 35 ครั้ง

จุดที่ 3 ช่วงการเคาะ 20 -30 ครั้ง

จุดที่ 4 ช่วงการเคาะ 15- 25 ครั้ง

และการทดลองที่มีจำนวนครั้งในการเคาะนอกช่วง 15 – 40 นั้นไม่สามารถใช้ได้

6) นำตัวอย่างจากถ้วยที่ทำการทดลองแล้ว นำไปอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส คำนวณหาปริมาณน้ำในดิน (water content) ของตัวอย่างดินแต่ละจุด

### 3.3.5 การทดสอบหาค่า Plastic Limit (P.L.) และ Plasticity Index (P.I.)

ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบกรมทางหลวงที่ ทล. -ท.103/2515



รูปที่ 3-12 การทดสอบ Plastic Limit

#### วิธีการทดสอบ

1) นำตัวอย่างประมาณ 8 กรัม มาคลุกเคล้ากับน้ำให้เข้ากันจนทั่ว หลังจากนั้นปั้นเป็นลักษณะยาวรี (Ellipsoidal Shape ) ดังรูปที่ 3-12

2) ใช้นิ้วมือคลึงตัวอย่างออกเป็นเส้นๆ ในอัตราการคลึง 80 ถึง 90 เทียบต่อวินาที ให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นตัวอย่างสม่ำเสมอจนเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงจนเท่ากับ 3.2 มิลลิเมตร (1/8 นิ้ว) และเส้นตัวอย่างแตกพอดี

3) หากตัวอย่างยังไม่ปรากฏรอยแตก ให้หักเส้นตัวอย่างออกเป็นทกหรือแปดชิ้น ขยำให้เข้ากันป็นเป็นรูปยาวรี และทำเช่นเดียวกับข้อ 2 หากตัวอย่างยังไม่แตกให้ทำเช่นนี้ซ้ำ ๆ

4) รวบรวมตัวอย่างที่แตกทั้งหมดใส่ลงในกระป๋องปิดฝาซึ่งน้ำหนักบันทึกค่า และนำไปอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส เพื่อคำนวณหาปริมาณน้ำในดิน (Water content)

5) ให้ทำการทดลองอย่างน้อยตัวอย่างละ 2 ครั้ง แต่ผลต่างของค่า Plastic Limit (P.L.) จะต้องไม่เกินร้อยละ 2

### 3.3.6 การทดสอบหาค่าการสึกหรอด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion

ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบกรมทางหลวงที่ ทล. -ท.202/2515



ก. เครื่องทดสอบการสึกหรอ ข. ลูกเหล็กทรงกลม  
รูปที่ 3-13 การทดสอบหาค่าการสึกหรอ

#### วิธีการทดสอบ

1) นำตัวอย่างที่ไม่มีดินเหนียวปน เช่น กรวดทราย หินโม่ ดากตัวอย่างจนแห้งหรืออบจนแห้งที่อุณหภูมิ 105 – 110 องศาเซลเซียส

2) นำตัวอย่างไปแยกตามขนาด Grading ตามตารางที่ 3-3 ถ้าเข้าได้หลาย Grading ให้เลือกใช้ตัวที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการใช้งานมากที่สุด

3) นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ และลูกเหล็กทรงกลม (Abrasive Charge) ตามจำนวนลูกดังแสดงในตารางที่ 3-9 หลังจากนั้นนำตัวอย่างใส่เข้าไปในเครื่อง Los Angeles ดังรูปที่ 3-13 ทำการหมุนเครื่องด้วยความเร็วที่ 30-33 รอบต่อนาที ให้ได้จำนวนรอบตามตารางที่ 3-4

4) นำตัวอย่างออก ล้างน้ำแยกมวลรวมที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 12 ทิ้ง นำส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 12 มาอบที่อุณหภูมิ 105 – 110 องศาเซลเซียส และชั่งมวลของตัวอย่างที่เหลือ

5) หลังจากนั้นทำการคำนวณดังนี้

$$\text{ความสึกหรอโดยใช้เครื่อง Los Angeles} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (3-1)$$

เมื่อ  $M_1$  = มวลตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ทดลอง

$M_2$  = มวลที่ค้างบนตะแกรง

ตารางที่ 3-3 Grading สำหรับการจัดกลุ่มการทดสอบและจำนวนรอบ

ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)		มวล (กรัม) และ Grading ของตัวอย่าง						
ผ่าน	ค้าง	A	B	C	D	E	F	G
75.0	63.0	-	-	-	-	2500+50	-	-
63.0	50.0	-	-	-	-	2500+50	-	-
50.0	37.5	-	-	-	-	5000+50	5000+10	-
37.5	25.0	1250+25	-	-	-	-	5000+25	5000+10
25.0	19.0	1250+25	-	-	-	-	-	-
19.0	12.5	1250+10	2500+50	-	-	-	-	-
12.5	9.5	1250+10	2500+50	-	-	-	-	-
9.5	6.3	-	-	2500+50	-	-	-	-
6.3	#4(4.75)	-	-	2500+50	-	-	-	-
#4(4.75)	#8(2.36)	-	-	-	5000+10	-	-	-
มวลตัวอย่างรวม		5000+10	5000+10	5000+10	5000+10	10000+100		
จำนวนรอบ		500				1000		

ตารางที่ 3-4 จำนวน Abrasive Charge จำแนกตาม Grading ของตัวอย่าง

จำนวน Abrasive Charge ที่ใช้ในการทดลองแต่ละ Grading		
Grading	Abrasive Charge (ลูก)	มวลรวม (กรัม)
A	12	5,000±25
B	11	4,584±25
C	8	3,330±20
D	6	2,500±15
E	12	5,000±25
F	12	5,000±25
G	12	5,000±25

หมายเหตุ : เครื่องชั่งซึ่งสามารถชั่งได้ 15 กิโลกรัม ความละเอียดอ่านได้ถึง 1 กรัม



### 3.3.7 การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

(Modified Compaction Proctor Test) ตามมาตรฐาน ทล. -ท 108/2517



รูปที่ 3-14 การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

#### วิธีการทดสอบ

1) เตรียมตัวอย่าง ถ้าขนาดก้อนใหญ่ที่สุด มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้เตรียมตัวอย่างดังต่อไปนี้

นำตัวอย่างมาทำให้แห้งโดยวิธีตากแห้ง และทำ Quartering หรือใช้เครื่องแบ่งตัวอย่าง เมื่อแห้งพอเหมาะแล้ว (มีปริมาณน้ำในดินประมาณร้อยละ 2 - 3) นำมาร่อนผ่านตะแกรงแบ่งเป็น 3 ขนาด คือ

- ขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)
- ขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) – 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)
- ขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)

ทำการชั่งหามวลของแต่ละขนาดที่เตรียมไว้ ตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร ให้ทิ้งไป จากนั้นทำการแทนที่ตัวอย่างทิ้งไปด้วยตัวอย่างที่มีขนาดระหว่าง 19.0 - 4.75 มิลลิเมตร ด้วยมวลที่เท่ากัน คลุกตัวอย่างที่ได้ให้เข้ากัน ชั่งตัวอย่างที่เตรียมไว้ ให้ใช้มวล 3,000 กรัม สำหรับการทดลอง 1 ครั้ง

2) นำตัวอย่างที่เตรียมไว้มาคลุกเคล้าจนเข้ากันดี เติมน้ำปริมาณหนึ่งโดยเริ่มต้นที่ร้อยละ 4 ของน้ำหนักตัวอย่าง (3,000 กรัม) และคลุกเคล้ากันจนทั่ว

3) แบ่งตัวอย่างใส่ลงในแบบที่เตรียมไว้ โดยให้ดินแต่ละชั้น เมื่อบดอัดแล้วมีความสูงประมาณ 1 ใน 5 ของ 127 มิลลิเมตร (5 นิ้ว)

4) ทำการบดอัดโดยค้อนดังรูปที่ 3-14 จำนวน 25 ครั้ง ดำเนินการบดทับจนได้ตัวอย่างที่บดอัดแล้วเป็นจำนวน 5 ชั้น มีความสูงประมาณ 127 มิลลิเมตร (5 นิ้ว) สูงกว่าแบบประมาณ 10 มิลลิเมตร ถอดปลอกออก ปาดแต่งหน้าให้เรียบเท่าระดับของตอนบนของแบบ กรณีมีหลุมบนหน้า ให้เติมดินและใช้ค้อนยางทุบจนเรียบ ให้แน่นพอควร ชั่งตัวอย่างมวลดิน และมวลรวมของแบบ เมื่อหักมวลรวมของแบบออกจะได้มวลของดินตัวอย่างเปียก (A)

5) ขณะเดียวกับที่ทำการบดอัดตัวอย่างในแบบ ให้นำดินใส่กระป๋องอบดินเพื่อนำไปหาปริมาณความชื้นในดินให้ใช้ดังนี้

- หากดินมีขนาดก้อนใหญ่สุด 19.0 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 300 กรัม เช่นเดียวกัน
- หากดินมีขนาดก้อนใหญ่สุด 4.75 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 100 กรัม

6) คำนวณหาค่าความหนาแน่นเปียก  $\rho_t$  (Wet density) และความหนาแน่นแห้ง  $\rho_d$  (Dry density) เมื่อทราบปริมาณความชื้นในดิน (Moisture Content, W)

7) ดำเนินการตามวิธีการข้างต้นอีกครั้ง โดยเพิ่มน้ำขึ้นร้อยละ 2 จนกว่าความหนาแน่นของตัวอย่างลดลงจึงหยุดการทดสอบ

8) คำนวณหาค่าความหนาแน่นเปียกและความหนาแน่นแห้งสูงสุด  $\rho_{d \max}$  และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC)

9) วิธีการคำนวณ

1. คำนวณหาค่าความหนาแน่นเปียก ( Wet Density ) ,  $\rho_t$

$$\rho_t = \frac{A}{V} \quad (3-2)$$

เมื่อ

$\rho_t$  = ความหนาแน่นเปียก มีหน่วยเป็น กรัมต่อมิลลิลิตร

A = มวลของดินเปียกที่บดทับในแบบ มีหน่วยเป็นกรัม

V = ปริมาตรของแบบ หรือปริมาตรของดินที่บดทับในแบบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

2. คำนวณหาค่าความหนาแน่นแห้ง ( Dry Density ) ,  $\rho_d$

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{W}{100}} \quad (3-3)$$

เมื่อ

$\rho_d$  = ความหนาแน่นแห้ง มีหน่วยเป็น กรัมต่อมิลลิลิตร

$\rho_t$  = ความหนาแน่นเปียก มีหน่วยเป็น กรัมต่อมิลลิลิตร

W = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ

### 3.4 การออกแบบอัตราส่วนผสม

#### 3.4.1 การออกแบบอัตราส่วนผสมของมวลรวมปรับปรุงด้วยซีเมนต์ตามมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์และรองพื้นทางซีเมนต์ของกรมทางหลวง

- การออกแบบเพื่อหาปริมาณร้อยละซีเมนต์ที่เหมาะสม
  1. กำหนดซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 1 2 3 และ 4 หรือไม่น้อยกว่า 4 ค่าผสมลงในมวลรวม
  2. จากนั้นทำการผสมส่วนของเหลวประกอบด้วยน้ำและพอลิเมอร์โดยกำหนดปริมาณจากค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) ด้วยการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Compaction Procter Test)
  3. ทำการบ่มตัวอย่างด้วยการห่อพลาสติกเป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นทำการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test, UCS)
  4. ทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับปริมาณร้อยละซีเมนต์
  5. พิจารณาจากกราฟกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวตามมาตรฐานชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางกำหนด จากนั้นจะได้ปริมาณร้อยละซีเมนต์ที่เหมาะสม

#### 3.4.2 การออกแบบอัตราส่วนผสมของมวลรวมปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์นั้นเป็นการออกแบบตามมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์และรองพื้นทางซีเมนต์ของกรมทางหลวง

เมื่อคำนวณร้อยละซีเมนต์ที่เหมาะสม จากวิธีการออกแบบในหัวข้อ 3.4.1 จะทำการออกแบบมวลรวมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ ดังนี้

1. ทำการเตรียมมวลรวม และซีเมนต์ตามร้อยละซีเมนต์ที่เหมาะสม
2. คลุกเคล้ามวลรวมและซีเมนต์ให้ทั่วกัน จากนั้นทำการเพิ่มของเหลวซึ่งประกอบด้วยน้ำและพอลิเมอร์ด้วยอัตราส่วน (น้ำ:พอลิเมอร์, ร้อยละ 50:50) ที่ความชื้นเริ่มต้นที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักมวลรวม และทำการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน
3. จากนั้นทำการหาปริมาณความชื้นในดิน (Moisture Content, W) ค่าความหนาแน่นเปียก  $\rho_t$  (Wet density) และความหนาแน่นแห้ง  $\rho_d$  (Dry density) เมื่อทราบปริมาณความชื้นในดิน (Moisture Content, W)
4. ดำเนินการตามวิธีการข้างต้นอีกครั้ง โดยเพิ่มน้ำขึ้นอีกร้อยละ 2 ต่อครั้ง จนกว่าความหนาแน่นของตัวอย่างลดลงจึงหยุดการทดสอบ
5. คำนวณหาค่าความหนาแน่นเปียกและความหนาแน่นแห้งสูงสุด  $\rho_{d \max}$  และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC)

### 3.5 การทดสอบประสิทธิภาพกำลังรับแรง

#### 3.5.1 การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test, UCS)

ตามมาตรฐาน ทล.ท 105/2517



รูปที่ 3-15 การทดสอบแรงอัดแกนเดียว

#### 1) การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดแกนเดียว

- ก. ทำการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานตามอัตราส่วนผสมที่ออกแบบ หลังจากนั้นทำการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 7 วัน ต้องทำการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง
- ข. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของตัวอย่าง
- ค. หลังจากนั้นนำตัวอย่างแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบ

#### 2) การทดสอบแรงอัดแกนเดียว

- ก. ติดตั้งตัวอย่างและเครื่องมือโดยวางแท่นตัวอย่างไว้ตรงกลางฐานของเครื่อง หลังจากนั้นทำการเลื่อนฐานกดด้านบนให้สัมผัสกับตัวอย่างพอดี
- ข. เริ่มทำการกดตัวอย่างโดยให้อัตราการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของเป็นร้อยละ 2 ของความสูงตัวอย่างต่อนาที
- ค. ทำการบันทึกน้ำหนักกดและระยะทางเคลื่อนที่ลงในแนวตั้งทุก ๆ 10 วินาที เมื่อค่าแรงกดลดลงจึงหยุดทำการทดสอบ

### 3.5.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength)

#### ตามมาตรฐาน ASTM D6931-17

ก้อนตัวอย่างนั้นขนาดเท่าก้อนแอสฟัลต์คอนกรีต มีขนาดความสูงประมาณ 6.3 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 10.1 เซนติเมตร และมีปริมาตรของก้อนตัวอย่างประมาณ 504.75 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำการบดอัดจำนวน 3 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง แบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ชนิด คือ กลุ่มก้อนตัวอย่างที่แช่ในน้ำ (Soaked) และกลุ่มก้อนตัวอย่างที่ไม่ได้แช่ในน้ำ (Unsoaked)

#### • วิธีการทดสอบ

(1) นำตัวอย่างวางบน Steel loading strip ที่อยู่ด้านล่าง แล้วปรับ Steel loading strip ที่อยู่ด้านบนลงมาสัมผัสกับผิวตัวอย่าง และตรวจสอบว่า Steel loading strip ต้องอยู่ตรงศูนย์กลางดังรูปที่ 3-16



รูปที่ 3-16 การทดสอบ Indirect Tensile Strength

(2) เดินเครื่องโดยให้น้ำหนักกดในแนวตั้งด้วยอัตราเร็ว  $50 \pm 5$  มิลลิเมตรต่อวินาทีอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งตัวอย่างพังทลาย บันทึกค่าน้ำหนักสูงสุด

(3) นำค่าที่บันทึกได้มาคำนวณหาค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength)

$$\sigma_T = \frac{2P}{\pi DT} \quad (3-4)$$

เมื่อ

$\sigma_T$  = Tension stress

P = น้ำหนักที่กระทำต่อก้อนตัวอย่าง (N)

T = ความสูงเฉลี่ยของตัวอย่าง (mm)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง (mm)

## (4) คำนวณอัตราส่วนกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength ratio)

เป็นการเปรียบเทียบผลกระทบของความชื้นที่ส่งผลต่อก่อนตัวอย่าง

$$\text{Tensile Strength Ratio, \%} = \frac{\text{Indirect Tensile strength of soaked specimens}}{\text{Indirect Tensile strength of Unsoaked specimens}} \times 100 \quad (3-5)$$

เมื่อ

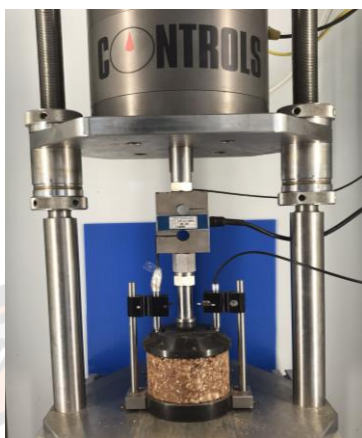
Indirect Tensile strength of soaked specimens = กำลังรับแรงดึงทางอ้อม  
ของตัวอย่างประเภทแช่น้ำ โดยการแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นทิ้งก้อนตัวอย่างให้หมาด

Indirect Tensile strength of Unsoaked specimens = กำลังรับแรงดึงทางอ้อม  
ของตัวอย่างประเภทไม่แช่น้ำ



### 1.5.3 การทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Dynamic Creep Test)

อ้างอิงและดัดแปลงตามมาตรฐาน AS 2891.12.1 (Standards Association of Australia)



รูปที่ 3-17 การทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร

เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (Permanent deformation) โดยจะให้น้ำหนักกระทำกับก้อนตัวอย่างตามแนวแกน (Axial Load) ในลักษณะกระทำซ้ำต่อก้อนตัวอย่าง

ปกติการทดสอบนี้จะใช้กับก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์มาตรฐานดังกล่าว ในการทดสอบมวลรวมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ มีวิธีเตรียมตัวอย่างและวิธีการทดสอบดังนี้

#### เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

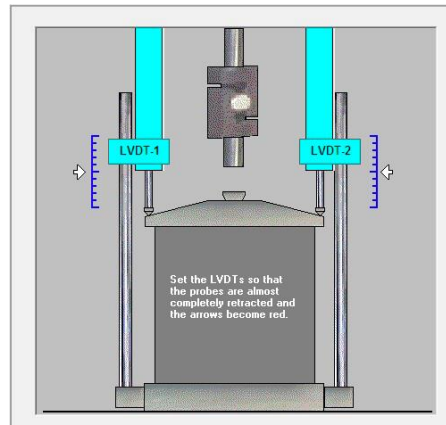
1. เครื่อง Universal Testing Machine, UTM

#### การเตรียมตัวอย่าง

1. ขึ้นก้อนตัวอย่างลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 101 มิลลิเมตร หนาประมาณ 50 มิลลิเมตร ทำการบดอัดจำนวน 3 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง
2. ทำการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 7 วัน

#### • วิธีการทดสอบ

1. ทำการวัดตัวอย่างก่อนการทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้งจากนั้นหาค่าเฉลี่ย
2. นำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบดังแสดงในรูป 3-17
3. ติดตั้ง (Variable Differential Transducers, LVDT) จำนวน 2 ชุดบริเวณด้านบนของก้อนตัวอย่างเพื่อวัดการยุบตัวในแนวตั้ง



รูปที่ 3-18 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร

4. จากนั้นกรอกข้อมูลในโปรแกรมที่ใช้กับเครื่อง UTM โดยกรอกรายละเอียดดังนี้

- (a) ขนาดความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง
- (b) กรอกค่าแรงกระทำ (Test stress) ซึ่งจะให้ค่าเท่ากับร้อยละ 20 ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive strength, UCS)
- (c) ค่าแรงกระทำเริ่มต้น 10 กิโลพาสคาล (Kpa)
- (d) ระยะเวลาการให้แรงเริ่มต้น 500 วินาที และ ระยะเวลาการพัก 150 วินาที
- (e) ระยะเวลาการให้แรง (Load Period)  $0.5 \pm 0.05$  วินาที
- (f) ระยะเวลาการทดสอบต่อ 1 รอบ (Pulse Period) 2 วินาที
- (g) การทดสอบนั้นจะสิ้นสุดเมื่อ (Pulse Period) เท่ากับ 40,000 รอบ หรือตัวอย่างมีการยุบตัวเกิน  $3,000 \mu\epsilon$  (ไมโครสเตรน)



Data Entry

Target test temperature = 25°C	⬇	To the nearest degree Celsius
Specimen diameter = 101 mms	⬇	To the nearest millimetre
Specimen thickness = 64 mms	⬇	To the nearest millimetre
Test stress = 500 kPa	⬇	To the nearest 10 kPa
Test period = 7200 seconds	⬇	To the nearest 100 seconds
Conditioning stress = 10 kPa	⬇	To the nearest 1 kPa
Conditioning period = 600 seconds	⬇	To the nearest 30 seconds
Relaxation period = 150 seconds	⬇	To the nearest 30 seconds

05:13 : 05:05:2021

Cooper Research Technology Limited

Exit Previous Continue

รูปที่ 3-19 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับการกรอกลงในโปรแกรมใช้กับเครื่อง UTM

5. คำนวณ Creep Stiffness จากสูตรดังนี้

$$\text{Creep Stiffness} = \frac{\text{Applied Stress}}{\text{Total Strain}} \quad (3-6)$$

เมื่อ

Applied Stress = ความเค้นที่กระทำกับตัวอย่าง

Total Strain = การยวบตัวในแนวตั้งของตัวอย่าง

### 3.6 การทดสอบประสิทธิภาพความทนทานความชื้น

#### 3.6.1 การทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดิน (Capillary Rise Test)

ตามมาตรฐาน AS 1141.53 (Standards Association of Australia)

#### • วิธีการทดสอบ

1. ทำการขึ้นก้อนตัวอย่างแบบ Modified Proctor Test จากนั้นทำการบ่มตัวอย่าง 7 วัน ดังรูปที่ 3-20 จากนั้นเข้าตู้อบที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน



รูปที่ 3-20 ก้อนตัวอย่างหลังจากการบ่มเป็นเวลา 7 วัน

2. นำตัวอย่างออกจากตู้อบ รอให้เย็นใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง
3. แฉ่น้ำในอ่างหรือถาดกันแบน ความสูง 1 เซนติเมตร (น้ำคงที่) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 วัน ดังรูปที่ 3-21



รูปที่ 3-21 ทำการทดสอบแช่น้ำเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

4. วัดค่าความสูงของระดับน้ำที่ 5 10 15 20 30 นาที และ 1 2 4 8 16 32 64 72 ชั่วโมง



รูปที่ 3-22 การวัดค่าและการชั่งน้ำหนักหลังจากแช่น้ำ 72 ชั่วโมง

5. การคำนวณการดูดซึมน้ำในมวลดิน (Capillary rise test, CR%)

$$CR, \% = \left( \frac{\text{ความสูงของน้ำที่ดูดซึม ณ เวลานั้น}}{\text{ความสูงทั้งก้อนตัวอย่าง}} \right) \times 100$$

(3-7)



### 3.6.2 การทดสอบความทนทาน (Durability Test) โดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wetting and drying) ตามมาตรฐาน ASTM D559

#### • วิธีการทดสอบ

การทดสอบความคงทน (Durability Test) ทดสอบโดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wetting-Drying) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ตัวอย่างเมื่อมีอายุการบ่มตามต้องการแล้ว นำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องทดลองเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำขึ้นมาชั่งน้ำหนัก



รูปที่ 3-23 นำตัวอย่างที่ทำการบ่มครบเวลา 7 วัน นำมาแช่น้ำเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง

2. นำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 71 องศาเซลเซียส (160 องศาฟาเรนไฮต์) นาน 42 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก



รูปที่ 3-24 ตัวอย่างหลังจากการอบ นาน 42 ชั่วโมง

3. ทุตัวอย่างด้วยแปรงลวด โดยตั้งตัวอย่างในแนวตั้งแล้วนำแปรงลวดมาถูขึ้นและลงให้รอบตัวอย่าง จำนวนประมาณ 18-20 ครั้ง ส่วนที่ผิวบนและล่างถูด้านละ 2-4 ครั้งให้ทั่วผิว ดังรูปที่ 3-25 การทุใช้แรงประมาณ 1.33 กิโลกรัม (3 ปอนด์) เสร็จแล้วนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก



รูปที่ 3-25 การอัดตัวอย่างดินด้วยแปรงทองเหลือง

4. วิธีการจากข้อ 1 ถึงข้อ 3 เป็นการทำครบ 1 รอบต้องทำการทดลองให้ครบ 12 รอบ แล้วนำตัวอย่างไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (230 องศาฟาเรนไฮต์) ซึ่งน้ำหนักของตัวอย่างแห้งอีกครั้ง

5. คำนวณร้อยละความสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง

$$\text{Soil retain, \%} = 100 - \left( \frac{\text{น้ำหนักเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักสุดท้าย}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \right) \times 100$$

(3-8)

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวม การทดสอบประสิทธิภาพกำลังรับแรงได้แก่ การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test, UCS) การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) การทดสอบการคืบตัวแบบไดนามิก (Dynamic Creep Test) การทดสอบประสิทธิภาพความทนทานความชื้น ได้แก่ การทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดิน (Capillary Rise Test) การทดสอบความทนทาน (Durability Test) โดยวิธีเปียกสลับแห้ง และโครงสร้างระดับจุลภาค (Micro structure) โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวม

ผลการทดสอบคุณสมบัติมวลรวม นั้นประกอบด้วยวัสดุมวลรวมทั้ง 3 ชนิดได้แก่ วัสดุดินปลายตะแกรง หินคลุก และวัสดุผิวทางเก่า

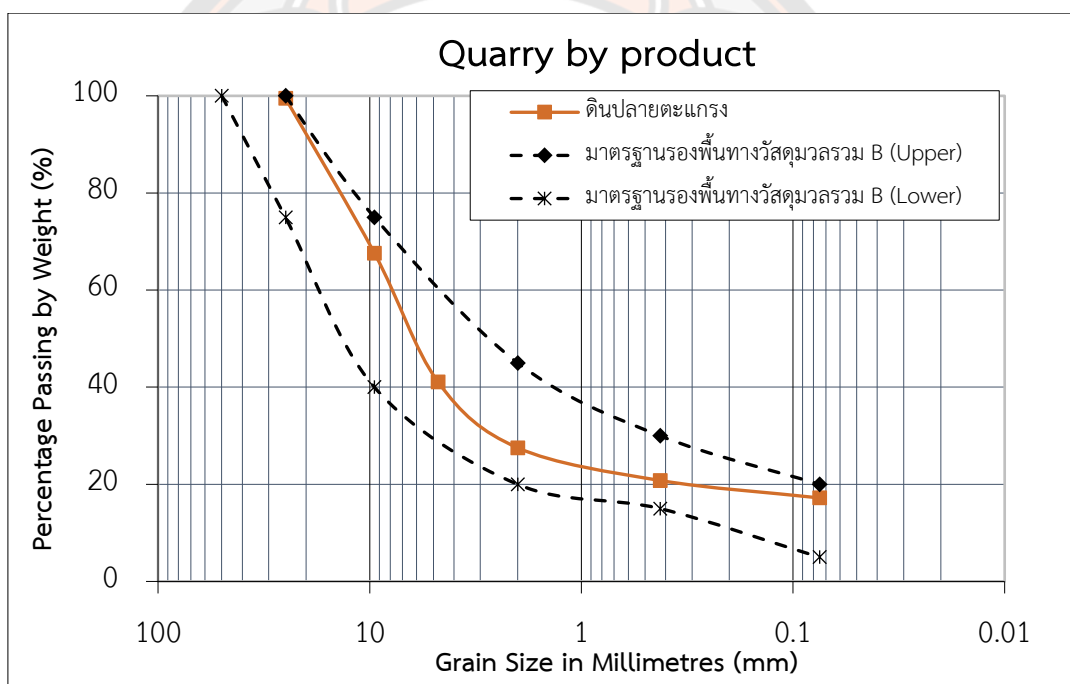
##### 4.1.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุดินปลายตะแกรง

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุดินปลายตะแกรง

วิธีการทดสอบคุณสมบัติ	ผลการทดสอบ	มาตรฐานกรมทางหลวง
		ทล.-ม 205/2532 รองพื้นทางวัสดุมวลรวม
ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit ; L.L)	24	ไม่เกินร้อยละ 35
พิกัดพลาสติก (Plastic Limit ; P.L.)	19.89	
ค่าดัชนีพลาสติก (Plastic Index; P.I.)	4.11	ไม่เกินร้อยละ 11
ร้อยละการสีกร่อนของ Coarse Aggregate; %	31.24	ไม่เกินร้อยละ 60
ผลการทดสอบหาค่า ร้อยละ CBR	6.6	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 25

ตารางที่ 4-2 ร้อยละผ่านตะแกรงวัสดุดินปลายตะแกรง

ขนาดตะแกรง มม.		ผลการ ทดสอบ %	มาตรฐานรองพื้นทางวัสดุมวลรวม (ทล.-ม 205 /2536) ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล				
			A	B	C	D	E
50	( 2 นิ้ว )	100	100	100	-	-	-
25.0	( 1 นิ้ว )	67.62	-	-	100	100	100
9.5	( 3/8 นิ้ว )	41.06	30-65	40-75	50-85	60-100	-
2.00	(เบอร์ 10)	27.53	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100
0.425	(เบอร์ 40)	20.79	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50
0.075	(เบอร์ 200)	17.20	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20

รูปที่ 4-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคมวลรวม  
และร้อยละผ่านตะแกรงของวัสดุดินปลายตะแกรง

จากรูปที่ 4-1 พบว่า ร้อยละผ่านตะแกรงของวัสดุดินปลายตะแกรงจัดอยู่ในกลุ่ม B และตารางที่ 4-1 พบว่า ผลการทดสอบ C.B.R. มีค่าร้อยละ 8 ซึ่งไม่ผ่านตามมาตรฐานรองพื้นวัสดุมวลรวม (ทล.-ม 205 /2536) กำหนด ทั้งนี้ผู้วิจัยจึงได้นำวัสดุดินปลายตะแกรงปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีขึ้นตามมาตรฐานรองพื้นทางซีเมนต์ และมาตรฐานพื้นทางซีเมนต์

## 4.1.2 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุหินคลุก

ตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุหินคลุก

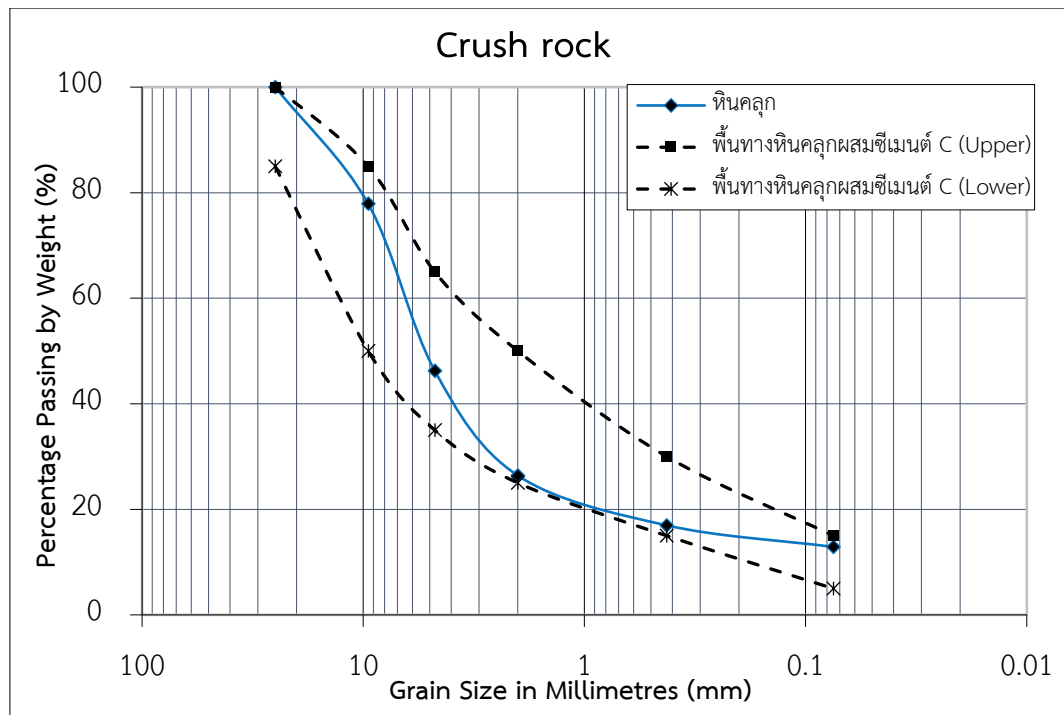
วิธีการทดสอบคุณสมบัติ	ผลการทดสอบ	มาตรฐานกรมทางหลวง
		ทล.ม 201/2544 ชั้นพื้นทางหินคลุก
ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit ; L.L)	24%	ไม่เกินร้อยละ 25
พิกัดพลาสติก (Plastic Limit ; P.L.)	22.01%	
ค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plastic Index ; P.I.)	2.95%	ไม่เกินร้อยละ 25
ร้อยละการสึกกร่อนของ Coarse Aggregate ; %	30.92%	ไม่เกินร้อยละ 40
ค่าความคงทน (Soundness)	1.77%	ไม่เกินร้อยละ 9
ผลการทดสอบหาค่าร้อยละ CBR	84%	ไม่น้อยกว่า ร้อยละ 80

ผลการทดสอบพบว่า คุณสมบัติพื้นฐานของหินคลุกนั้นผ่านตามมาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ และร้อยละผ่านตะแกรงของวัสดุหินคลุกจัดอยู่ในกลุ่ม C

ตารางที่ 4-4 ร้อยละผ่านตะแกรงของวัสดุหินคลุก

ขนาดตะแกรง มม.		ผลการทดสอบ %	มาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ (ทล.-ม 203 /2556) ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล		
			B	C	D
50	( 2 นิ้ว )	100.00	100	-	-
25.0	( 1 นิ้ว )	100.00	75-95	100	100
9.50	( 3/8 นิ้ว )	77.89	40-75	50-85	60-100
4.75	(เบอร์ 4)	46.26	30-60	35-65	50-85
2.00	(เบอร์ 10)	26.40	20-45	25-50	40-70
0.425	(เบอร์ 40)	16.97	15-30	15-30	25-45
0.075	(เบอร์ 200)	12.87	5-20	5-15	5-20



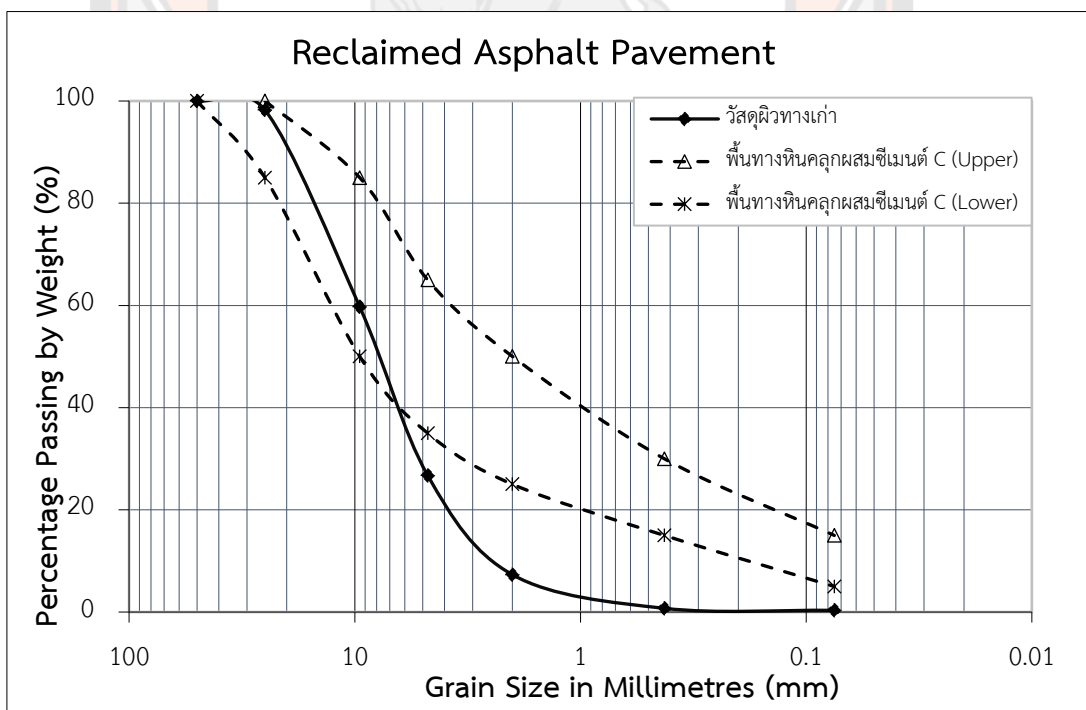


รูปที่ 4-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคมวลรวม  
และร้อยละผ่านตะแกรงของวัสดุหินคลุก

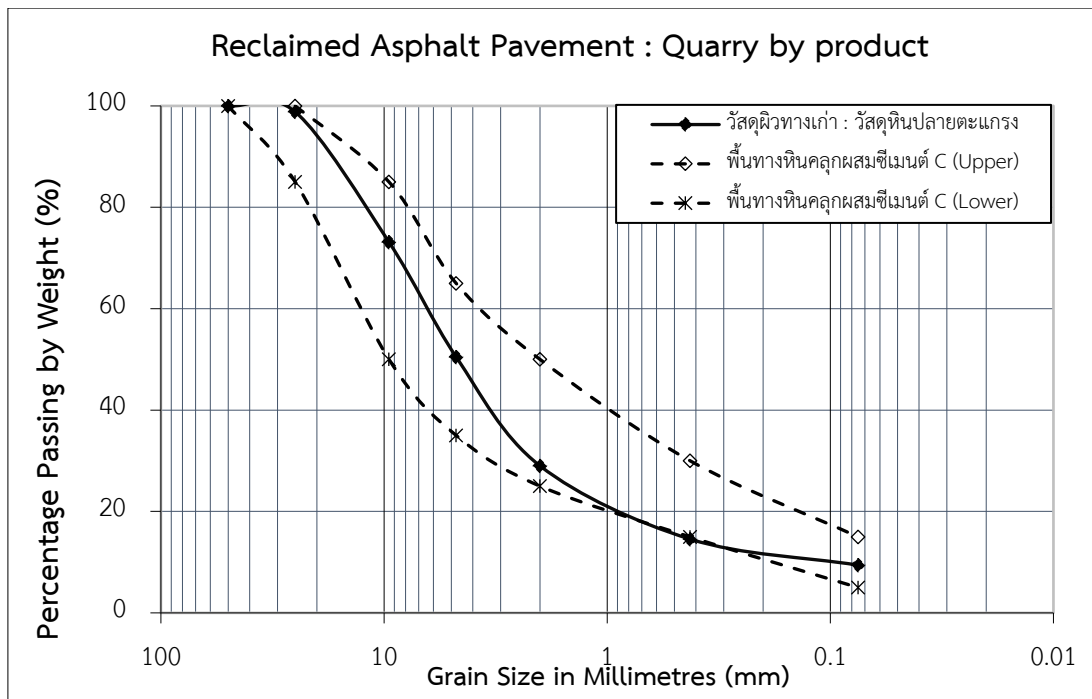
#### 4.1.3 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผิวทางเก่า

ตารางที่ 4-5 ร้อยละผ่านตะแกรงของวัสดุผิวทางเก่า

ขนาดตะแกรง มม.		ผลการ ทดสอบ RAP %	ผลการ ทดสอบ (RAP: QB) (2:1) %	มาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุกผสม ซีเมนต์ (ทล.ม 203 /2556) ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล		
				B	C	D
50	( 2 นิ้ว )	100	100	100	-	-
25.0	( 1 นิ้ว )	98.23	98.82	75-95	100	100
9.50	( 3/8 นิ้ว )	59.70	73.13	40-75	50-85	60-100
4.75	(เบอร์ 4)	26.73	50.49	30-60	35-65	50-85
2.00	(เบอร์ 10)	7.30	29.00	20-45	25-50	40-70
0.425	(เบอร์ 40)	0.73	14.56	15-30	15-30	25-45
0.075	(เบอร์ 200)	0.33	9.42	5-20	5-15	5-20



รูปที่ 4-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคมวลรวมและร้อยละผ่านตะแกรง  
ของวัสดุผิวทางเก่า



รูปที่ 4-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคมวลรวมและร้อยละผ่านตะแกรงของวัสดุผิวทางเก่าผสมดินปลายตะแกรงที่อัตราส่วน ( 2 ต่อ 1 )

ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผิวทางเก่า

วิธีการทดสอบคุณสมบัติ	ผลการทดสอบ	มาตรฐานกรมทางหลวง
		ทล.ม 201/2544 พื้นทางหินคลุก
ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit ; L.L)	N/A	ไม่เกินร้อยละ 25
พิกัดพลาสติก (Plastic Limit ; P.L.)	N/A	-
ค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plastic Index ; P.I.)	Non-plastic	ไม่เกินร้อยละ 25
ร้อยละการสึกกร่อนของ Coarse Aggregate ; %	23.79%	ไม่เกินร้อยละ 40
ค่าความคงทน (Soundness)	5.87%	ไม่เกินร้อยละ 9
ผลการทดสอบหาค่าร้อยละ CBR	45.02	ไม่น้อยกว่า ร้อยละ 80

จากรูปที่ 4-3 แสดงให้เห็นว่าขนาดคละของอนุภาคของวัสดุผิวทางเก่า มีร้อยละผ่านตะแกรงระหว่างเบอร์ 4 ถึง เบอร์ 200 ( 4.75 ถึง 0.075 มม.) ที่ไม่ผ่านตามมาตรฐานหินคลุกผสมซีเมนต์ ผู้วิจัยจึงได้ทำการผสมวัสดุดินปลายตะแกรง ขนาด ( 4.75 ถึง 0.075 มม.) เพื่อปรับปรุงขนาดคละของวัสดุโดยพบว่า ร้อยละผ่านตะแกรงของวัสดุดังกล่าวนั้นผ่านตามมาตรฐานหินคลุกผสมซีเมนต์ กำหนดตามรูปที่ 4-4 ดังนั้นในงานวิจัยนี้วัสดุผิวทางเก่าที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะมีผสมวัสดุดินปลายตะแกรงดังนี้ ในอัตราส่วนระหว่างวัสดุผิวทางเก่าต่อวัสดุดินปลายตะแกรง (2:1) ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด

จากตารางที่ 4-6 พบว่าผลการทดสอบหาค่าร้อยละ CBR มีค่า 45.02 นั้นมีคุณสมบัติที่ไม่ผ่านมาตรฐานกรมทางหลวง ผู้วิจัยจึงได้นำวัสดุดังกล่าวปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีขึ้นตามมาตรฐานรองพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ และมาตรฐานพื้นทางซีเมนต์



รูปที่ 4-5 วัสดุผิวทางเก่าผสมดินปลายตะแกรงที่อัตราส่วน ( 2 ต่อ 1)

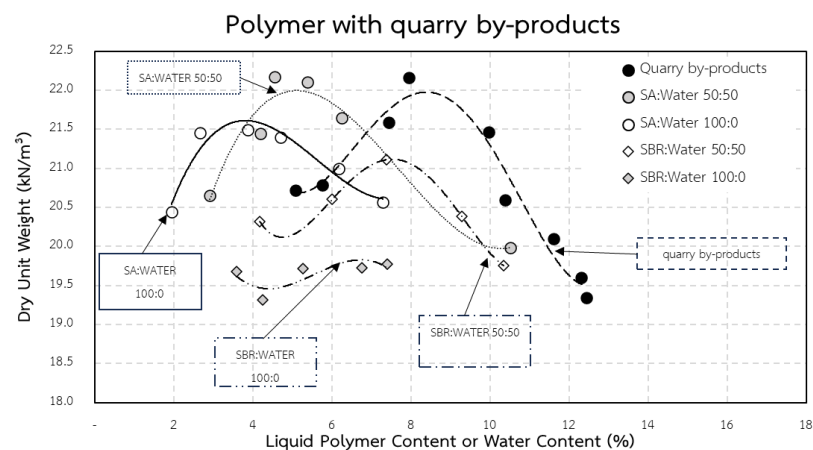
## 4.2 การทดสอบออกแบบอัตราส่วนผสม

การออกแบบอัตราส่วนผสมนั้นผู้วิจัยได้มีการดำเนินการแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

### 4.2.1 การออกแบบอัตราส่วนผสมระหว่างพอลิเมอร์และน้ำ

การทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์และน้ำ เพื่อนำไปใช้เชื่อมประสานระหว่างวัสดุมวลรวม ประกอบด้วยพอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก (SA) และพอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอิน (SBR) โดยมีอัตราส่วนผสมดังนี้

- พอลิเมอร์ชนิด SA : น้ำ (อัตราส่วนร้อยละ 100 : 0)
- พอลิเมอร์ชนิด SA : น้ำ (อัตราส่วนร้อยละ 50 : 50)
- พอลิเมอร์ชนิด SBR : น้ำ (อัตราส่วนร้อยละ 100 : 0)
- พอลิเมอร์ชนิด SBR : น้ำ (อัตราส่วนร้อยละ 50 : 50)



รูปที่ 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์

ตารางที่ 4-7 สรุปความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์

อัตราส่วน Polymer: Water	Optimum Moisture Content % OMC	Maximum Dry Density kN/m <sup>3</sup>
SA: Water (50:50)	4.8	22.2
SA: Water (100:0)	3.2	21.6
SBR: Water (50:50)	7.4	21.1
SBR: Water (100:0)	7.3	19.8

จากตารางที่ 4-7 ชี้ให้เห็นว่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) และความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ของวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ : น้ำ (100:0) พบว่า เมื่อปริมาณพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) และความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับของวัสดุรวมที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ : น้ำ (50:50)

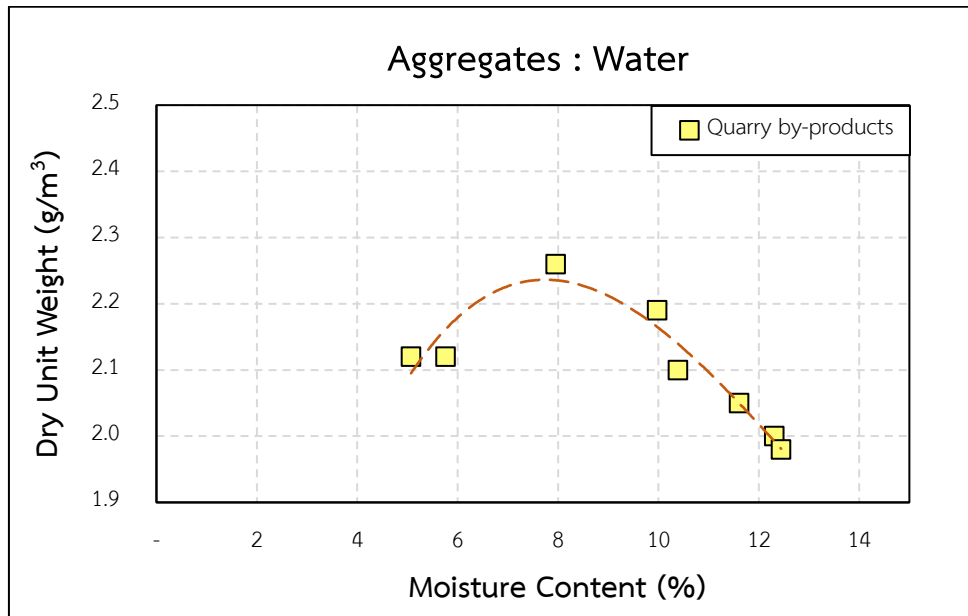
อีกทั้งพบว่าเมื่อเติมพอลิเมอร์ : น้ำ (100:0) นั้นพอลิเมอร์กระจายตัวในเนื้อดินไม่ดี ส่งผลให้ดินจับตัวเป็นก้อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกำหนดอัตราส่วนผสม พอลิเมอร์:น้ำ ที่อัตราส่วน ร้อยละ 50 : 50



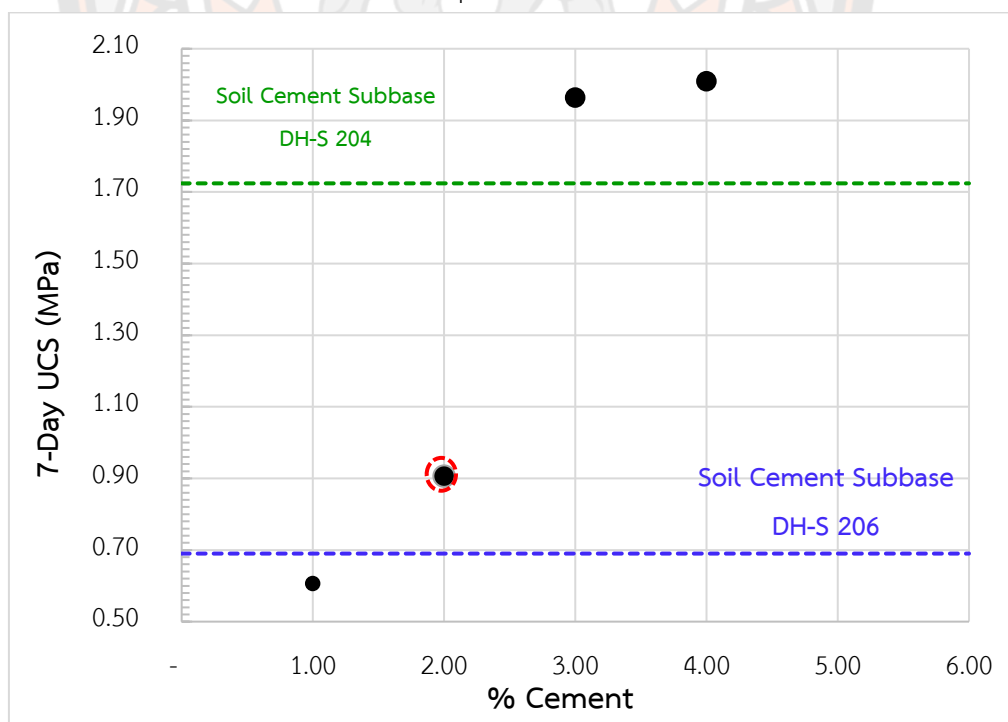
รูปที่ 4-7 ก้อนตัวอย่างที่เสียรูปจากความชื้น

เมื่อนำก้อนตัวอย่างที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ : พอลิเมอร์ เมื่อนำไปแช่น้ำพบว่า ก้อนตัวอย่างพังทลายไม่สามารถทนต่อความชื้นได้ ดังรูปที่ 4-7 อีกทั้งจากการศึกษางานวิจัยของ (Suksun Horpibulsuk, 2010) กล่าวว่า วัสดุซีเมนต์จะเติมเต็มช่องว่างของรูพรุน และช่วยเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างอนุภาค ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการแบบอัตราส่วนผสมด้วยการเติมซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของมวลรวม

#### 4.2.2 การออกแบบหาปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม



รูปที่ 4-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุดินปลายตะแกรง



รูปที่ 4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับปริมาณร้อยละซีเมนต์ต่างๆของวัสดุดินปลายตะแกรง

จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Proctor Test) ตามมาตรฐาน ทล. -ท 108/2517 ของวัสดุดินปลายตะแกรงพบว่า ความหนาแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับ  $2.25 \text{ g/m}^3$  และความชื้นที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 8 ดังรูปที่ 4-8

จากนั้นเพิ่มซีเมนต์ในมวลรวมที่อัตราส่วนร้อยละ 1 2 3 และ 4 ทำการบดอัดก้อนตัวอย่าง ด้วยวิธีบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ความชื้นที่เหมาะสมร้อยละ 8 บ่มตัวอย่างด้วยการห่อพลาสติก เป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นทำการทดสอบแรงอัดแกนเดียว จะได้กราฟความสัมพันธ์รูปที่ 4-9 พบว่า วัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ร้อยละ 2 นั้นมีกำลังรับแรงอัดแกนเดียว  $0.9 \text{ MPa}$  ซึ่งผ่านมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ ทล.-ม. 206/2556 อีกทั้งงานวิจัยนี้เปรียบเทียบวัสดุ งานทางที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ผู้วิจัยจึงกำหนดปริมาณซีเมนต์ที่ร้อยละ 2 กับทุกวัสดุเพื่อง่ายต่อการ วิเคราะห์และการเปรียบเทียบข้อมูล





#### 4.2.3 การออกแบบอัตราส่วนผสมของมวลรวมปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์

การใช้วัสดุมวลรวมทั้ง 3 ชนิด ที่ประกอบด้วย ดินปลายตะแกรง หินคลุก วัสดุผิวทางเก่า และแบ่งเป็นตัวอย่างเป็น 4 ชนิด ดังนี้

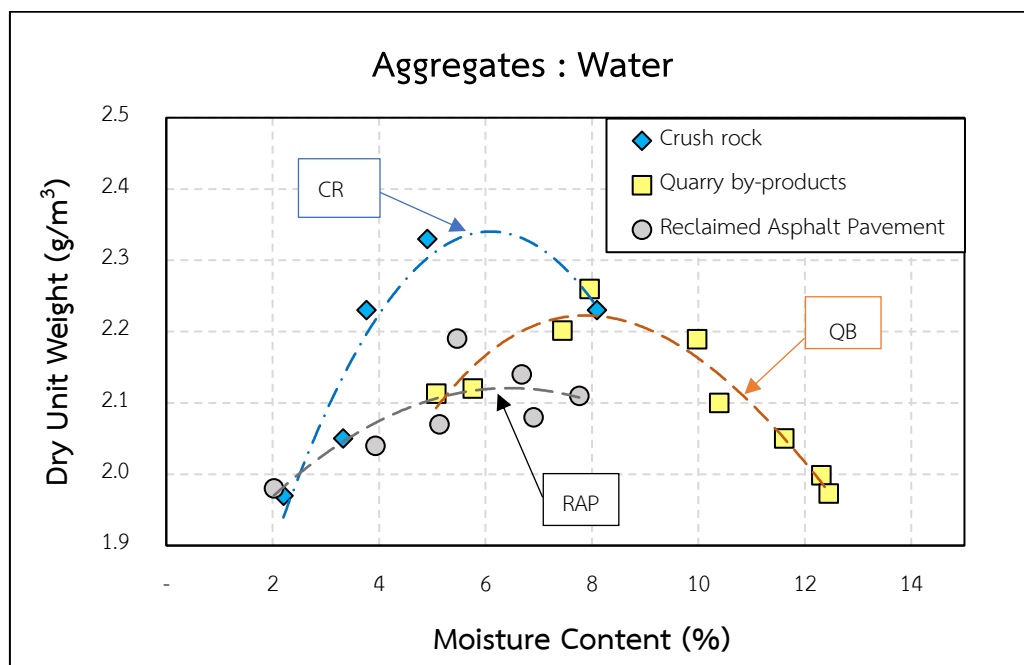
1. วัสดุมวลรวม
2. วัสดุมวลรวมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์
3. วัสดุมวลรวมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ ชนิดสไตรีนอะคริลิก (SA)
4. วัสดุมวลรวมปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ ชนิดสไตรีนบิวตาไดอิน (SBR)

จากการออกแบบอัตราส่วนผสมในหัวข้อ 4.2.1 และ 4.2.2 นั้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-8 และทำการทดสอบแบบสูงกว่ามาตรฐานโดยทำการเพิ่มปริมาณความชื้นที่ต่างๆ เพื่อหาความชื้นที่เหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) ของแต่ละวัสดุ

ตารางที่ 4-8 สรุปอัตราส่วนผสมของมวลรวมปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์

อัตราส่วนผสม					
ลำดับ	ประเภทตัวอย่าง	ซีเมนต์ ต่อน้ำหนักดินแห้ง (%)	อัตราส่วนร้อยละ (น้ำ : พอลิเมอร์) ที่ความชื้นต่างๆ ต่อน้ำหนักดินแห้ง		
			น้ำ (%)	พอลิเมอร์ (%)	
				ชนิด SA	ชนิด SBR
วัสดุดินปลายตะแกรง (Quarry by product)					
1	QB	-	100	-	-
2	QB-C	2	100	-	-
3	QB-CSA	2	50	50	-
4	QB-CSBR	2	50	-	50
วัสดุหินคลุก (Crush rock)					
1	CR	-	100	-	-
2	CR-C	2	100	-	-
3	CR-CSA	2	50	50	-
4	CR-CSBR	2	50	-	50
วัสดุผิวทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement : RAP ) วัสดุผิวทางเก่า : วัสดุดินปลายตะแกรง (2:1)					
1	RAP	-	100	-	-
2	RAP-C	2	100	-	-
3	RAP-CSA	2	50	50	-
4	RAP-CSBR	2	50	-	50

### 4.3 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน



รูปที่ 4-10 กราฟความสัมพันธ์ความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุมวลรวม

ตารางที่ 4-9 สรุปความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุมวลรวม

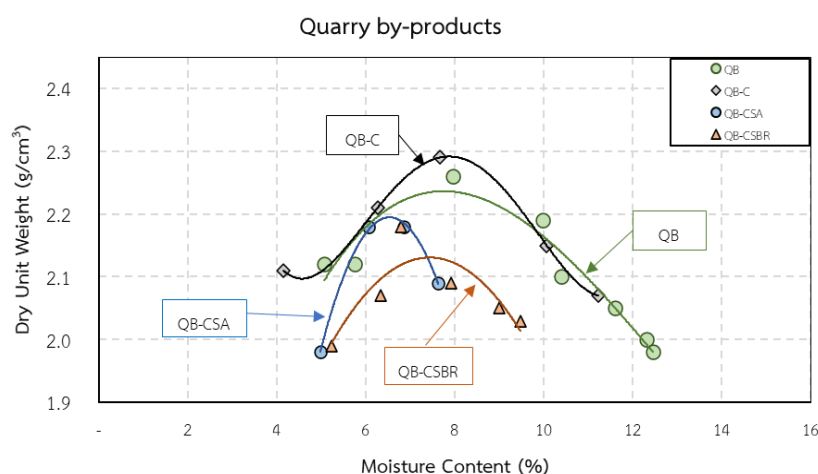
ประเภทวัสดุ	ความชื้นที่เหมาะสม Optimum Moisture Content (%)	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด Maximum Dry Density (g/cm <sup>3</sup> )
1. ดินปลายตะแกรง (QB)	8	2.25
2. หินคลุก (CR)	5.7	2.3
3. วัสดุผิวทางเก่า (RAP)	6	2.12

จากผลการทดสอบเห็นได้ว่า ค่าความชื้นที่เหมาะสมและค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของทั้ง 3 ชนิด นั้นมีค่าแตกต่างกันดังตารางที่ 4-9 เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่างกัน จากความชื้นที่เหมาะสมต่างกันส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดต่างกันด้วย จะพบว่าหินคลุกมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมากกว่าดินปลายตะแกรงและวัสดุผิวทางเก่า แต่ในทางตรงกันข้ามหินคลุกมีค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมน้อยกว่าวัสดุผิวทางเก่า และดินปลายตะแกรง

#### 4.3.1 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงคุณภาพ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบประเภทดินปลายตะแกรงนั้นจะแบ่งออกเป็น 4 ชนิดดังนี้

1. วัสดุดินปลายตะแกรง (QB)
2. วัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (QB-C)
3. วัสดุดินปลายตะแกรงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ ชนิดสไตรีนอะคริลิก (QB-CSA)
4. วัสดุดินปลายตะแกรงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ ชนิดสไตรีนบิวตาไดอีน (QB-CSBR)



รูปที่ 4-11 กราฟความสัมพันธ์ความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุดินปลายตะแกรง

ตารางที่ 4-10 สรุปผลการทดสอบความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุหินคลุก

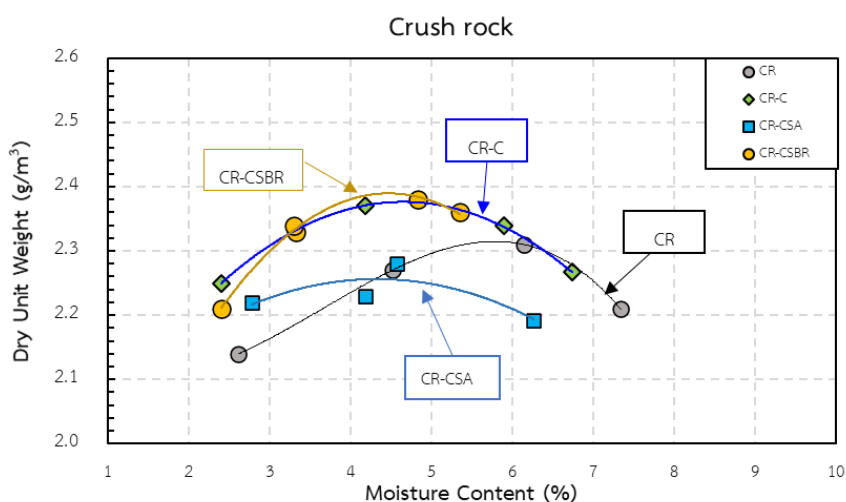
ประเภทวัสดุ	ความชื้นที่เหมาะสม Optimum Moisture Content (%)	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด Maximum Dry Density (g/cm <sup>3</sup> )
QB	8	2.25
QB-C	7.7	2.29
QB-CSA	6.06	2.17
QB-CSBR	7.3	2.14

จากผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุดินปลายตะแกรง พบว่าเมื่อตัวอย่างดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด จะส่งผลให้

ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) และความชื้นที่เหมาะสม (OMC) มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างดินปลายตะแกรง และตัวอย่างดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์นั้นมีความหนาแน่นแห้งสูงกว่าตัวอย่างชนิดอื่นๆ

#### 4.3.2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุหินคลุกที่ปรับปรุงคุณภาพวัสดุที่ใช้ในการทดสอบประเภทหินคลุกนั้นจะแบ่งออกเป็น 4 ชนิดดังนี้

1. วัสดุหินคลุก (CR)
2. วัสดุหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (CR-C)
3. วัสดุหินคลุกด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ ชนิดสไตรีนอะคริลิค (CR-CSA)
4. วัสดุหินคลุกด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ ชนิดสไตรีนบิวตาไดอิน (CR-CSBR)



รูปที่ 4-12 กราฟความสัมพันธ์ความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุหินคลุกที่ปรับปรุงคุณภาพ

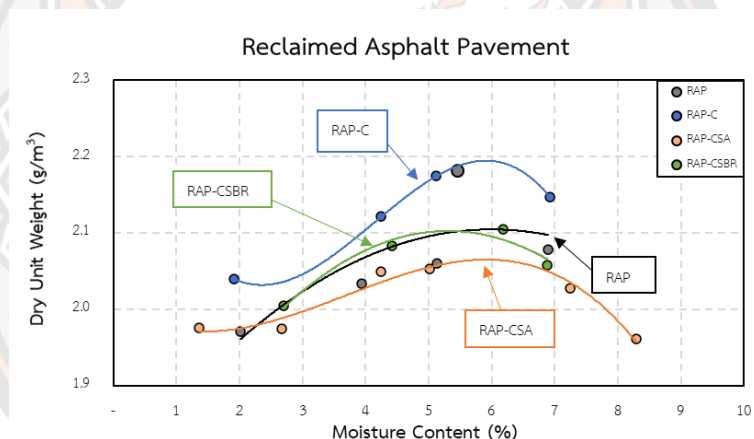
ตารางที่ 4-11 สรุปผลการทดสอบความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุหินคลุก

ประเภทวัสดุ	ความชื้นที่เหมาะสม Optimum Moisture Content (%)	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด Maximum Dry Density (g/cm <sup>3</sup> )
CR	5.7	2.32
CR-C	4.6	2.38
CR-CSA	4.3	2.26
CR-CSBR	4.5	2.39

จากผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุหินคลุก พบว่าวัสดุหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (CR-C) และหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR (CR-CSBR) มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) และความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ที่ใกล้เคียงกัน และหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA (CR-CSA) มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) น้อยที่สุด

4.3.2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุผิวทางเก่าที่ปรับปรุงคุณภาพวัสดุที่ใช้ในการทดสอบประเภทวัสดุผิวทางเก่านั้นจะแบ่งออกเป็น 4 ชนิดดังนี้

1. วัสดุผิวทางเก่า (RAP)
2. วัสดุผิวทางเก่าที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (RAP-C)
3. วัสดุผิวทางเก่าด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ ชนิดสไตรีนอะคริลิก (RAP -CSA)
4. วัสดุผิวทางเก่าด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ ชนิดสไตรีนบิวตาไดอิน (RAP-CSBR)

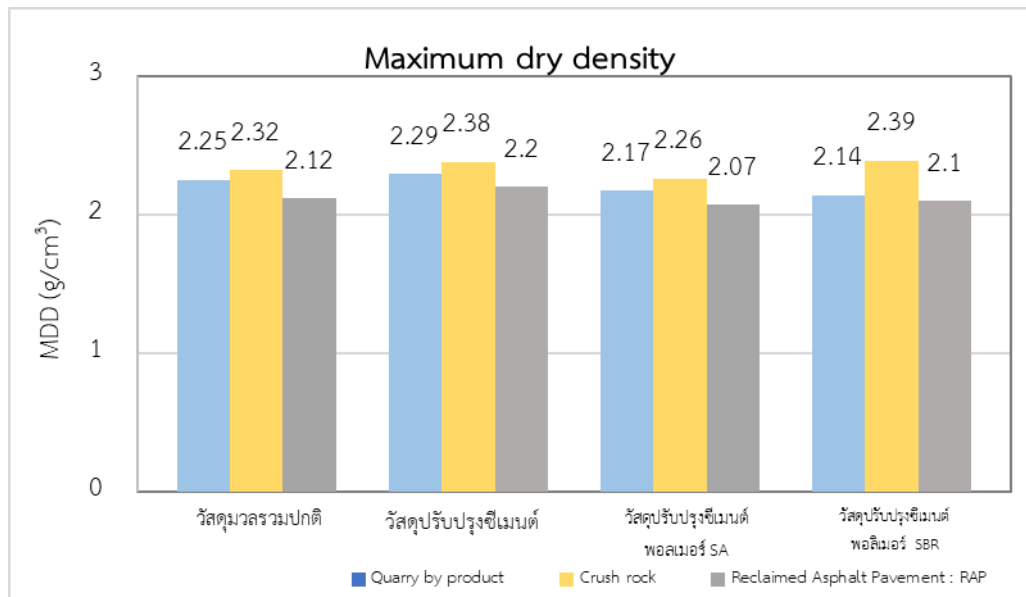


รูปที่ 4-13 กราฟความสัมพันธ์ความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุผิวทางเก่าที่ปรับปรุงคุณภาพ

ตารางที่ 4-12 สรุปความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุผิวทางเก่า

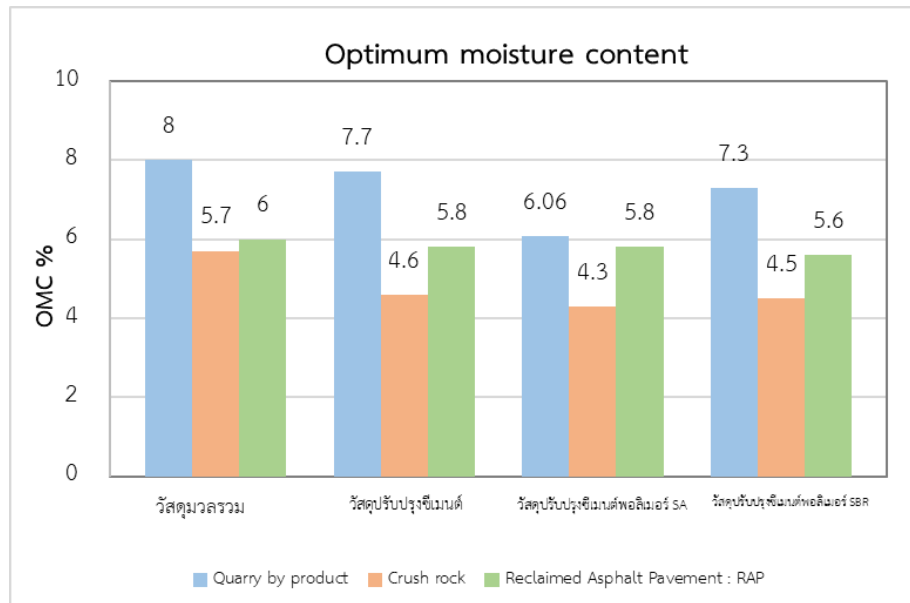
ประเภทวัสดุ	ความชื้นที่เหมาะสม Optimum Moisture Content (%)	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด Maximum Dry Density (g/cm <sup>3</sup> )
RAP	6	2.12
RAP-C	5.8	2.2
RAP -CSA	5.8	2.07
RAP-CSBR	5.6	2.12

จากผลการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุผิวทางเก่า พบว่าวัสดุผิวทางเก่าที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (RAP-C) นั้นความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) มากที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น อีกทั้งวัสดุมีการปรับปรุงคุณภาพด้วยพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด ส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งของวัสดุมีค่าลดลง



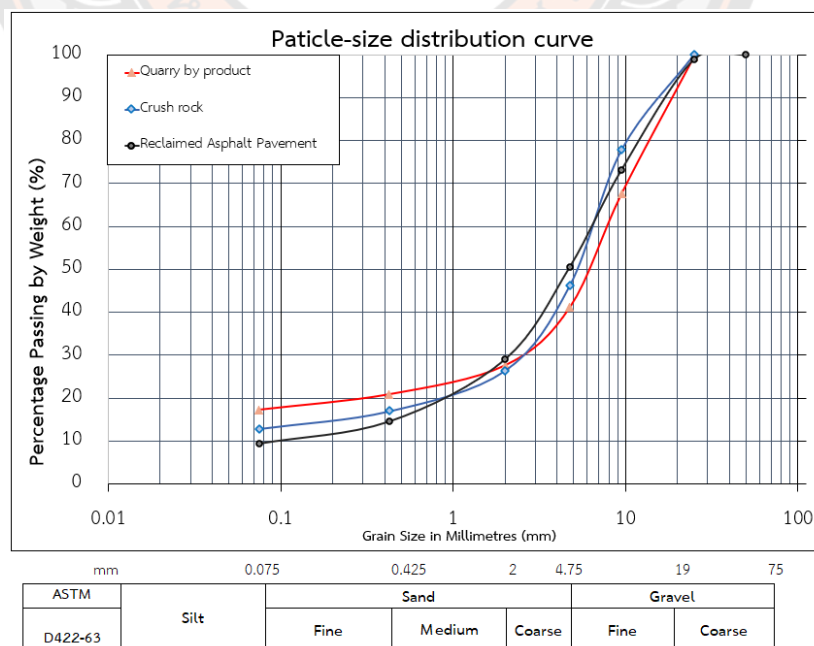
รูปที่ 4-14 การเปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งสูงสุดจากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุ

จากการเปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุทั้ง 3 ชนิดดังรูปที่ 4-14 พบว่า วัสดุมวลรวมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์จะมีค่าความหนาแน่นสูงสุด (MDD) มากที่สุด โดยวัสดุที่ปรับปรุงวัสดุด้วยพอลิเมอร์ชนิด SA และ SBR นั้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นสูงสุด (MDD) ลดลง จะมีเพียงวัสดุหินคลุกเท่านั้นที่พอลิเมอร์ SBR จะส่งผลให้ผลให้ความหนาแน่นสูงสุด (MDD) เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-15 การเปรียบเทียบความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุ

จากรูปที่ 4-15 ซึ่งเห็นได้ว่าการเปรียบเทียบความชื้นที่เหมาะสมจากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุพบว่าความชื้นที่เหมาะสมในวัสดุดินปลายตะแกรง (Quarry by product) จะมีค่ามากกว่าวัสดุชนิดอื่น ทั้งนี้ผู้วิจัยสมมติฐานว่าเกิดจากขนาดคละของเม็ดวัสดุดินปลายตะแกรงนั้นไม่ตี (Gap Grade) ประกอบกับมีปริมาณดินเม็ดละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ที่มากกว่าวัสดุหินคลุก (CR) และวัสดุผิวทางเก่า (RAP) ดังรูปที่ 4-16



รูปที่ 4-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคมวลรวมและร้อยละผ่านตะแกรงของวัสดุ

#### 4.5 อัตราส่วนผสมและขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

จากผลการทดสอบความชื้นที่เหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด(MDD) ของวัสดุแต่ละชนิด ผู้วิจัยจึงทำการขึ้นก้อนตัวอย่างที่ความชื้นที่เหมาะสม (OMC) แบ่งขนาดตัวอย่างเป็น 2 แบบได้แก่

1. ตัวอย่างแบบที่ 1 มีลักษณะเป็นทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 10.16 เซนติเมตร และความสูง 11.68 เซนติเมตร ใช้สำหรับการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (UCS) การทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดิน (Capillary Rise Test) และ การทดสอบความทนทาน (Durability Test) โดยมีเตรียมตัวอย่างด้วยอัตราส่วนผสมดังตารางที่ 4-13 และบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ทล. -ท 108/2517)

ตารางที่ 4-13 อัตราส่วนผสมสำหรับตัวอย่างแบบที่ 1

อัตราส่วนผสมสำหรับขนาดตัวอย่างแบบที่ 1							
ลำดับ	ประเภท	ความชื้นที่เหมาะสม OMC (%)	มวลรวม (กรัม)	ซีเมนต์ (กรัม)	น้ำ (กรัม)	พอลิเมอร์ (กรัม)	
						SA	SBR
<b>วัสดุดินปลายตะแกรง (QB)</b>							
1	QB	8.0	3,000	-	240	-	-
2	QB-C	7.7	3,000	60	236	-	-
3	QB-CSA	6.1	3,000	60	93	93	-
4	QB-CSBR	7.3	3,000	60	112	-	112
<b>วัสดุหินคลุก (CR)</b>							
1	CR	5.7	3,000	-	171	-	-
2	CR-C	4.6	3,000	60	141	-	-
3	CR-CSA	4.3	3,000	60	66	66	-
4	CR-CSBR	4.5	3,000	60	69	-	69
<b>วัสดุผิวทางเก่า (RAP)</b>							
			RAP	QB			
1	RAP	6.0	2,000	1,000	-	180	-
2	RAP-C	5.8	2,000	1,000	60	177	-
3	RAP-CSA	5.8	2,000	1,000	60	89	89
4	RAP-CSBR	5.6	2,000	1,000	60	86	86



2. ตัวอย่างแบบที่ 2 มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 101 มิลลิเมตร ความสูงประมาณ 50 มิลลิเมตร ใช้สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) การทดสอบต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Dynamic Creep Test) โดยมีเตรียมตัวอย่างด้วยอัตราส่วนผสมดังตารางที่ 4-14 และการบดอัด จำนวน 3 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง

ตารางที่ 4-14 อัตราส่วนผสมสำหรับตัวอย่างแบบที่ 2

อัตราส่วนผสมสำหรับตัวอย่างประเภทที่ 2								
ขนาดก้อนตัวอย่าง (cm)		H = 6.3		D = 10.1	Vol (cm <sup>3</sup> ) = 504.75			
ลำดับ	ประเภท	ความชื้นที่ เหมาะสม	MDD	มวลรวม (กรัม)	ซีเมนต์ (กรัม)	น้ำ (กรัม)	พอลิเมอร์ (กรัม)	
		OMC (%)	g/cm <sup>3</sup>				SA	SBR
วัสดุดินปลายตะแกรง (QB)								
1	QB	8	2.25	1136	-	91	-	-
2	QB-C	7.7	2.29	1156	23	91	-	-
3	QB-CSA	6.06	2.17	1095	22	34	34	-
4	QB-CSBR	7.3	2.14	1080	22	40	-	40
วัสดุหินคลุก (CR)								
1	CR	5.7	2.32	1161	-	66	-	-
2	CR-C	4.6	2.38	1201	24	56	-	-
3	CR-CSA	4.3	2.26	1141	23	25	25	-
4	CR-CSBR	4.5	2.39	1206	24	28	-	28
วัสดุผิวทางเก่า (RAP)				RAP	QB			
1	RAP	6	2.12	717	353	-	64	-
2	RAP-C	5.8	2.20	744	366	22	66	-
3	RAP-CSA	5.8	2.07	700	345	21	31	31
4	RAP-CSBR	5.6	2.12	717	353	21	31	31

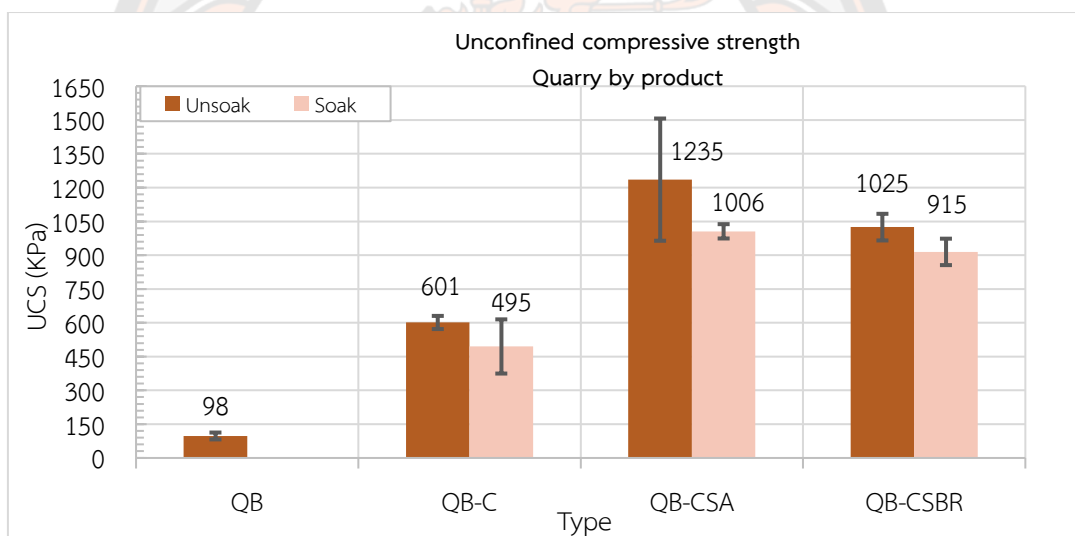
#### 4.6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพกำลังรับแรง

ในการทดสอบประสิทธิภาพกำลังรับแรงนั้น แบ่งออกเป็น 3 ชนิดได้แก่ การทดสอบแรงอัด และการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม การทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนรูปถาวร

##### 4.6.1 ผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test, UCS)

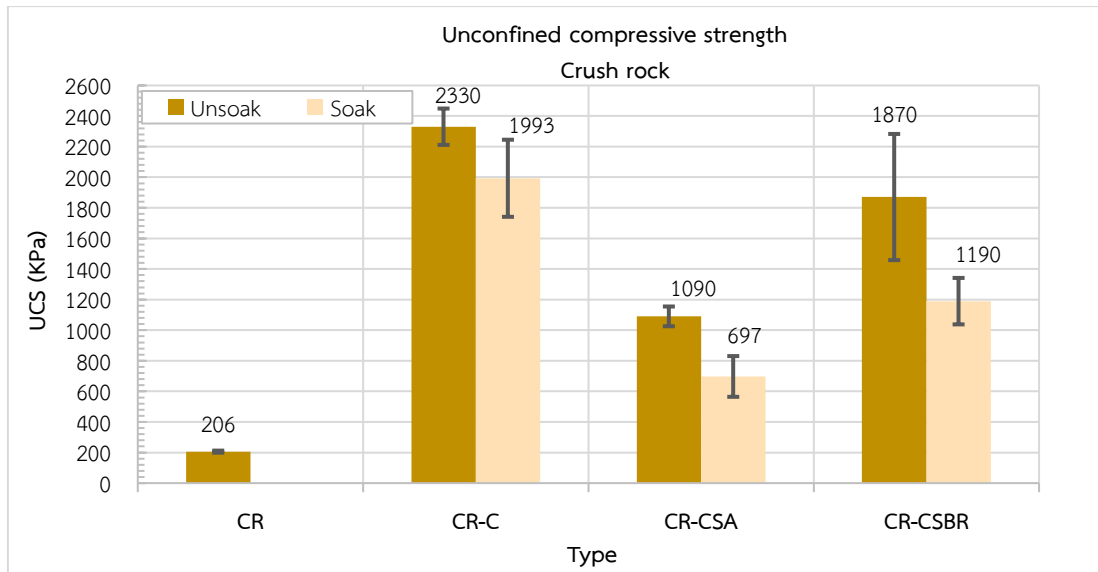
เมื่อเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานตามหัวข้อ 4.5 ในข้างต้น และทำการโดยแบ่งตัวอย่างทั้งหมด 2 ประเภทได้แก่

- **ประเภทที่ 1 ไม่แช่น้ำ (Unsoaked)** ทำการทดสอบกำลังรับแรง หลังจากการบดอัดตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7 วัน
- **ประเภทที่ 2 แช่น้ำ (Soaked)** นำตัวอย่างที่บดระยะเวลา 7 วัน แช่น้ำเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงก่อน หลังจากนั้นพักก่อนตัวอย่างให้หมาดก่อนทำการทดสอบกำลังรับแรง (ตามมาตรฐานกรมทางหลวง)

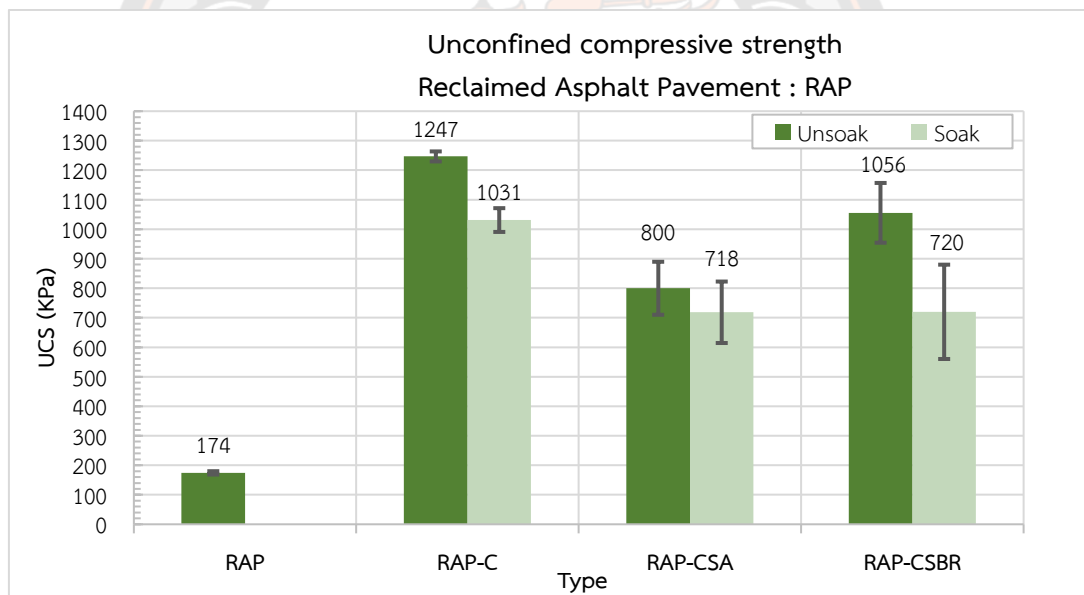


รูปที่ 4-17 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินปลายตะแกรง

เมื่อพิจารณารูปที่ 4-17 พบว่าเมื่อวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดนั้นกำลังรับแรงอัดของวัสดุดินปลายตะแกรงมีค่าสูงกว่าดินปลายตะแกรงปกติ (QB) และดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (QB-C) อีกทั้งพบว่าดินปลายตะแกรงปกติ (QB) ของตัวอย่างแช่น้ำนั้นไม่สามารถทำการทดสอบได้เนื่องจากตัวอย่างพังทลายขณะแช่น้ำ



รูปที่ 4-18 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของหินคลุก



รูปที่ 4-19 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุผิวทางเก่า

จากรูปที่ 4-18 และ 4-19 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของหินคลุกและวัสดุผิวทางเก่ามีแนวโน้มเดียวกัน กล่าวคือเมื่อวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด SA และ SBR นั้นมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ อีกทั้งวัสดุรวมรวมปกติของวัสดุทั้งหินคลุกและวัสดุผิวทางเก่าของกลุ่มตัวอย่างแช่น้ำไม่สามารถทดสอบได้เนื่องจากวัสดุพังทลายขณะแช่น้ำ

ตารางที่ 4-15 ตารางสรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ลำดับที่	ประเภทตัวอย่าง	ประเภทไม่แช่น้ำ		ประเภทแช่น้ำ	
		UCS (KPa)	S.D.	UCS (KPa)	S.D.
<b>วัสดุหินปลายตะแกรง (Quarry by product)</b>					
1	QB	98	15	-	-
2	QB-C	601	29	495	120
3	QB-CSA	1235	271	1006	32
4	QB-CSBR	1025	59	915	59
<b>วัสดุหินคลุก (Crush rock)</b>					
1	CR	206	7	-	-
2	CR-C	2330	119	1993	252
3	CR-CSA	1090	65	697	133
4	CR-CSBR	1870	412	1190	152
<b>วัสดุผิวทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement : RAP )</b>					
1	RAP	174	6	-	-
2	RAP-C	1247	17	1031	40
3	RAP-CSA	800	90	718	104
4	RAP-CSBR	1056	101	720	160

เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวดังตารางที่ 4-15 พบว่า

-วัสดุมวลรวมปกติทั้ง 3 ชนิด ในกลุ่มตัวอย่างแช่น้ำแล้วเกิดการพังทลายขณะแช่น้ำ ไม่สามารถนำมาทดสอบกำลังรับแรงได้

-วัสดุหินคลุก (Crush rock) และวัสดุผิวทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement , RAP) ที่ปรับปรุงคุณภาพเฉพาะซีเมนต์นั้นมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวยิ่งสูงกว่า วัสดุปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด ตรงกันข้ามวัสดุหินปลายตะแกรงที่วัสดุปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA และ SBR ที่มีกำลังรับแรงอัดแกนเดียวยิ่งสูงกว่าวัสดุหินคลุกและวัสดุผิวทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement , RAP) ที่ปรับปรุงคุณภาพเฉพาะซีเมนต์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสาเหตุว่า ดินปลายตะแกรงนั้นมีค่าความชื้นที่เหมาะสม (OMC) สูงกว่าวัสดุอื่น มีใช้ปริมาณน้ำที่มากตาม จึงอาจส่งผลให้ซีเมนต์เกิดปฏิกิริยา Hydration ได้สมบูรณ์จึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพการรับแรงที่ดีขึ้น

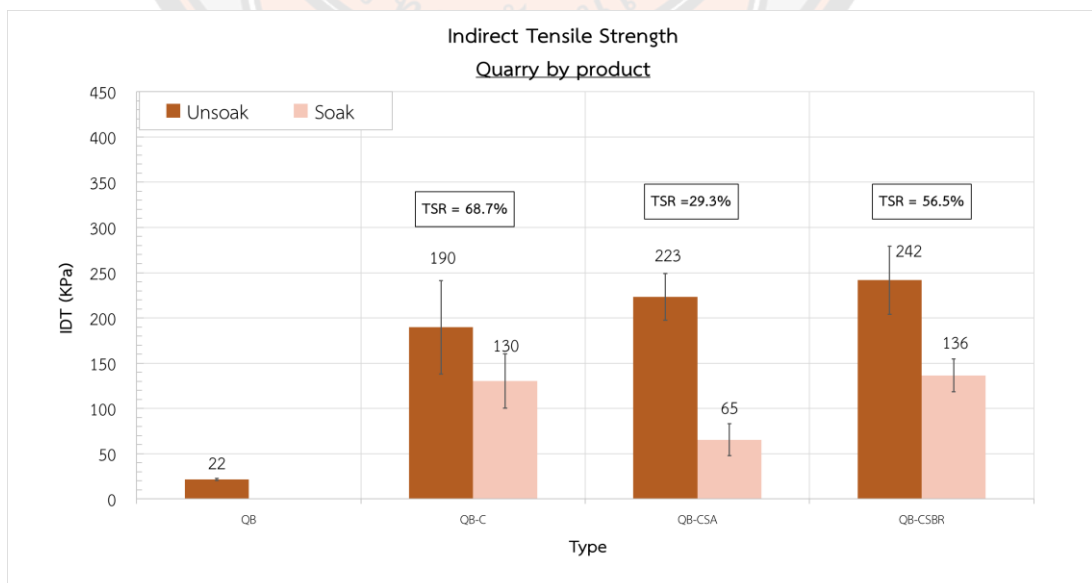
#### 4.6.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength)

จากการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบที่มีขนาดเท่าก้อนแอสฟัลต์คอนกรีต ด้วยวิธีการบดอัดตามอัตราส่วนผสมตัวอย่างกำลังรับแรงดึงทางอ้อม ดังหัวข้อ 4.5 และแบ่งตัวอย่างทั้งหมด 2 ประเภทได้แก่

- **ประเภทที่ 1 ไม่แช่น้ำ (Unsoaked)** ทำการทดสอบกำลังรับแรง หลังจากการบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7 วัน
- **ประเภทที่ 2 แช่น้ำ (Soaked)** แช่น้ำเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงก่อน หลังจากนั้นพักก่อนตัวอย่างให้หมาดน้ำก่อนทำการทดสอบกำลังรับแรง

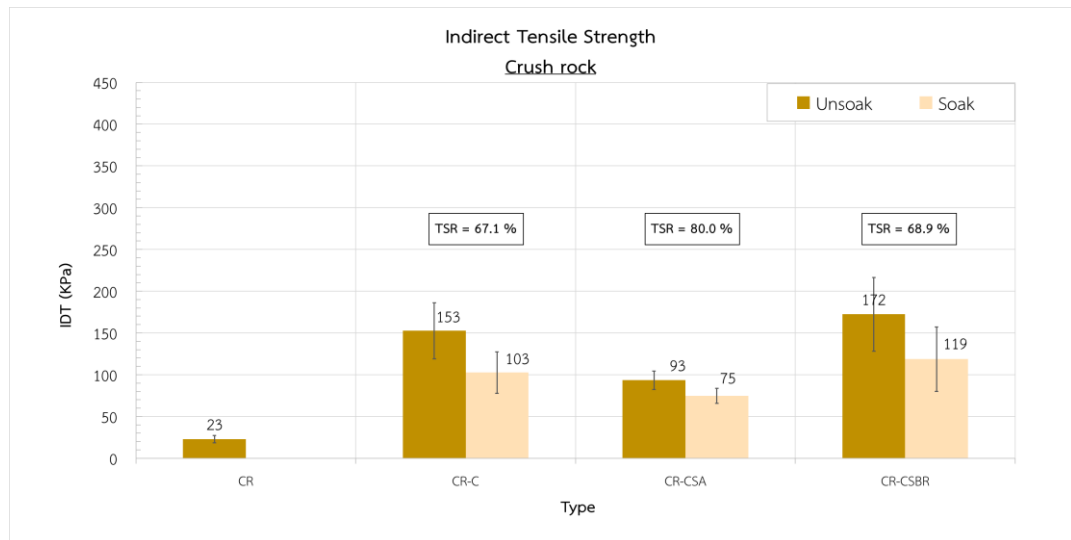


รูปที่ 4-20 ก่อนตัวอย่างกำลังรับแรงดึงทางอ้อม

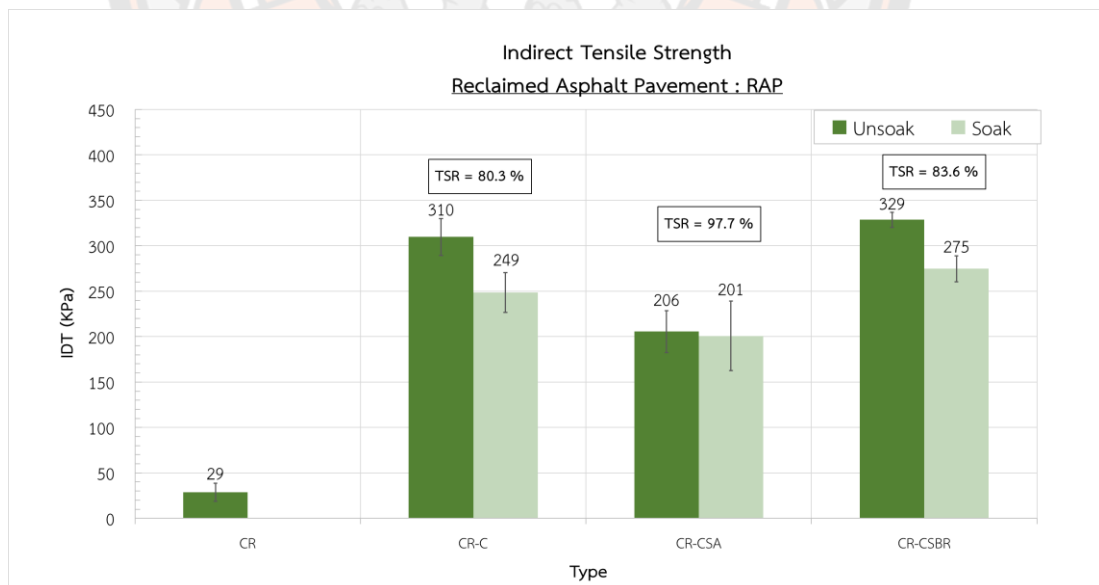


รูปที่ 4-21 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินปลายตะแกรง

จากรูปที่ 4-21 พบว่าเมื่อเติมพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด SA และ SBR กำลังรับแรงดึงทางอ้อมนั้นสูงกว่าชนิด QB-C ทางตรงกันข้ามเมื่อพิจารณาในกลุ่มตัวอย่างเช่นน้ำวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA (QB-CSA) กำลังรับแรงดึงของวัสดุนั้นมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ QB-C และ QB-CSBR

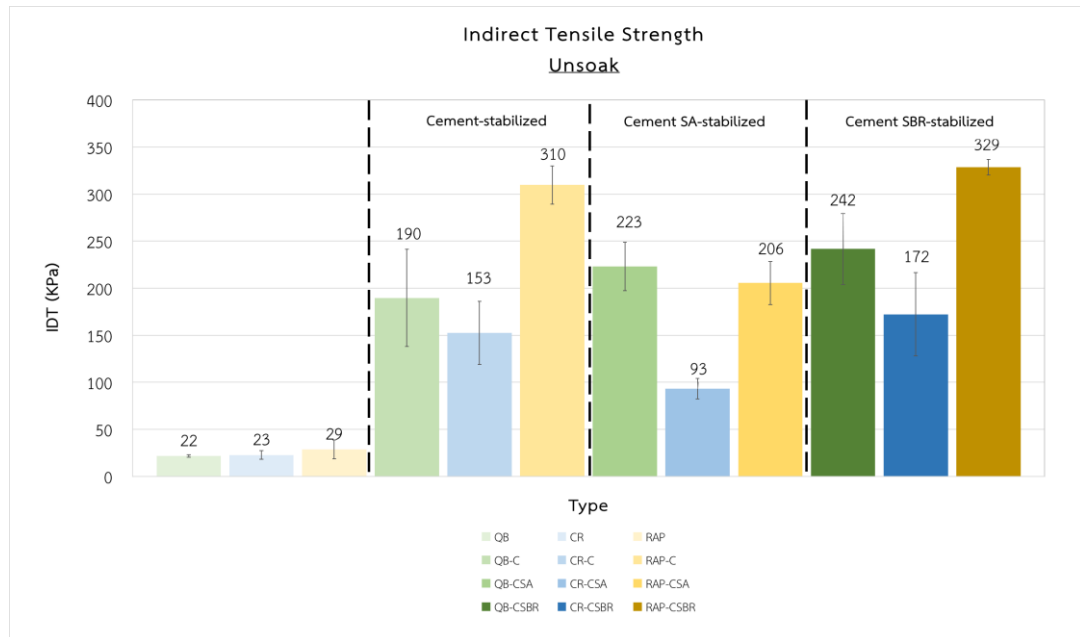


รูปที่ 4-22 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของหินคลุก

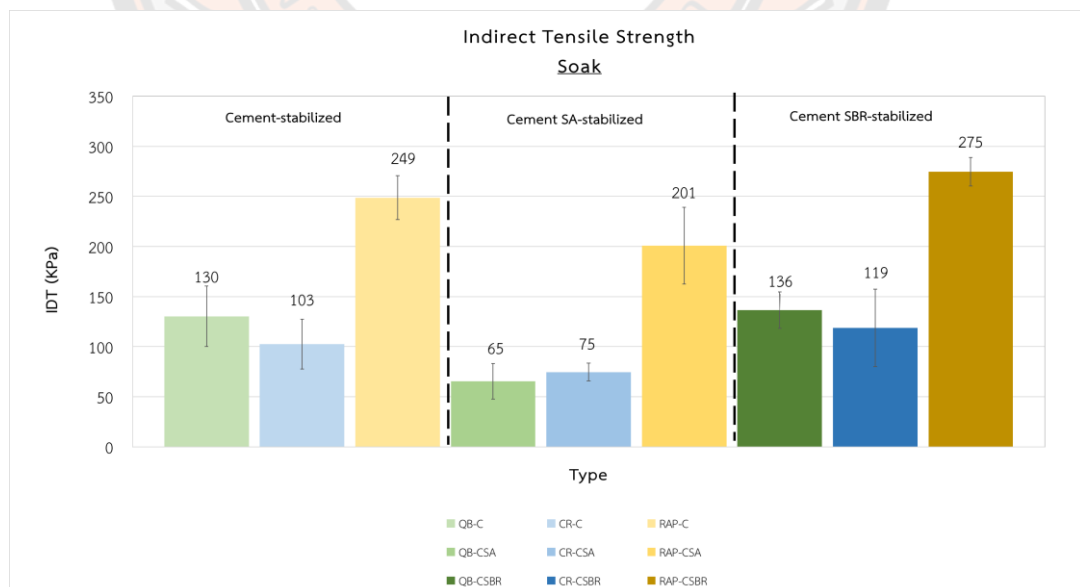


รูปที่ 4-23 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุผิวทางเก่า

จากรูปที่ 4-22 และ 4-23 พบว่า วัสดุหินคลุกและวัสดุผิวทางเก่านั้นมีแนวโน้มเดียวกัน เมื่อปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR มีผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงที่มากที่สุด เมื่อเทียบกับ วัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และมีค่าน้อยในวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA



รูปที่ 4-24 กราฟการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุประเภทไม่แช่น้ำ



รูปที่ 4-25 กราฟการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุประเภทแช่น้ำ

ตารางที่ 4-16 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างกำลังรับแรงดิ่งทางอ้อม

ลำดับที่	ประเภทตัวอย่าง	ประเภทไม่แช่น้ำ		ประเภทแช่น้ำ		TSR %
		IDT (KPa)	S.D.	IDT(KPa)	S.D.	
<b>ดินปลายตะแกรง (Quarry by product)</b>						
1	QB	21.7	1.3	-	-	-
2	QB-C	189.7	51.7	130.3	30.2	68.7
3	QB-CSA	223.2	25.8	65.4	17.7	29.3
4	QB-CSBR	241.8	37.7	136.5	18.0	56.5
<b>หินคลุก (Crush rock)</b>						
1	CR	23	4.47	-	-	-
2	CR-C	153	33.50	103	24.7	67.1
3	CR-CSA	93	11.02	75	9.0	80.0
4	CR-CSBR	172	44.09	119	38.7	68.9
<b>วัสดุผิวทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement : RAP)</b>						
1	RAP	29	10.12	-	-	-
2	RAP-C	310	20.31	249	21.9	80.3
3	RAP-CSA	206	23.00	201	38.4	97.7
4	RAP-CSBR	329	8.39	275	14.3	83.6

การเปรียบเทียบผลการทดสอบตัวอย่างกำลังรับแรงดิ่งทางอ้อมประเภท ไม่แช่น้ำ (Unsoaked) ดังรูปที่ 4-24 จะพบว่า

- เมื่อพิจารณาวัสดุทั้ง 3 ชนิดที่ยังไม่ได้ปรับปรุงนั้นวัสดุกำลังรับแรงดิ่งทางอ้อมมีค่าต่ำมากและซึ่งอยู่ในช่วง 21-29 KPa
- วัสดุผิวทางเก่าที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (RAP-C) และวัสดุผิวทางเก่าที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ ชนิด SA และ SBR มีค่ากำลังรับแรงดิ่งทางอ้อมสูงที่สุดและพบว่าวัสดุหินคลุกมีกำลังรับแรงดิ่งทางอ้อมที่น้อยที่สุด
- วัสดุรวมทั้งหมดทั้ง 3 ชนิดนั้นมีกำลังรับแรงดิ่งทางอ้อมที่สูงที่สุดในวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR



การเปรียบเทียบผลการทดสอบตัวอย่างกำลังรับแรงดึงทางอ้อมประเภท แช่น้ำ (Soaked) ดังรูปที่ 4-25 จะพบว่า

- มวลรวมชนิดวัสดุผิวทางเก่า (RAP) มีค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมสูงกว่าวัสดุประเภท หินคลุก และวัสดุดินปลายตะแกรงเช่นเดียวกับตัวอย่างไม่แช่น้ำ (Unsoaked) ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะวัสดุแอลฟิลด์เก่า นั้นเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคมวลดิน ให้รับแรงได้เพิ่มขึ้น
- เมื่อปรับปรุงวัสดุทั้ง 3 ชนิดด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR นั้นมีกำลังรับแรงดึง สูงที่สุดในทิศทางเดียวกับตัวอย่างไม่แช่น้ำ (Unsoaked)

เปรียบเทียบอัตราส่วนกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength Ratio ,TSR) จากตารางที่ 4-16 พบว่า

- เมื่อพิจารณาวัสดุผิวทางเก่าและหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด นั้นจะมีค่า TSR สูงกว่าวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์อย่างเดียว
- วัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงทั้งหมดนั้น ค่า TSR ต่ำกว่าร้อยละ 69 ซึ่งวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (QB-C) นั้นมีค่า TSR ที่สูงกว่า วัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด

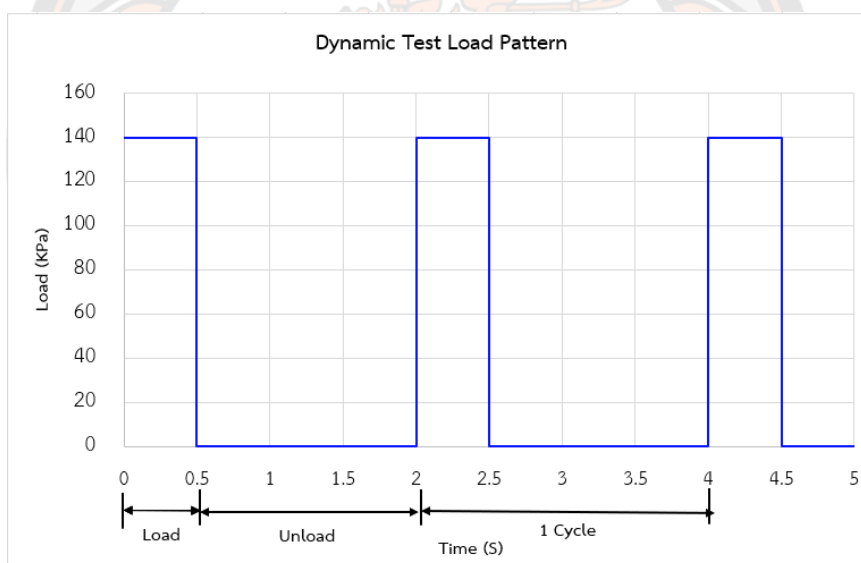
ดังนั้นสรุปได้ว่าวัสดุพอลิเมอร์ชนิด SBR มีส่วนช่วยในการพัฒนา กำลังรับแรงดึงได้ดีกว่าวัสดุ ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ในวัสดุรวมรวมทั้ง 3 ชนิดเช่นเดียวกับงานวิจัยของ (Khumkud, 2023)

#### 4.6.3 ผลการทดสอบด้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Dynamic Creep Test)

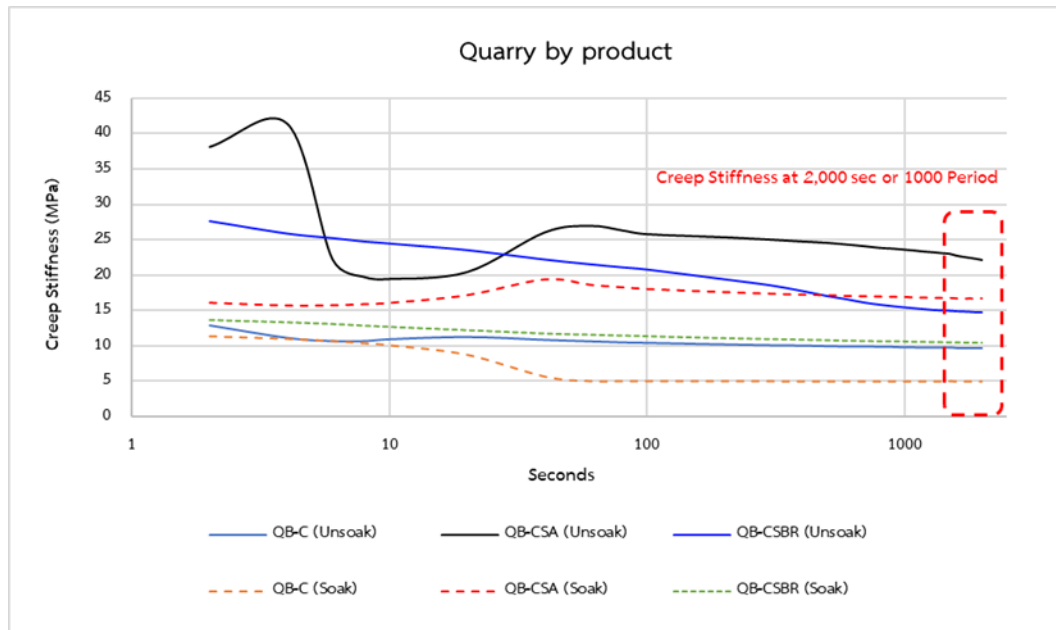
เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาการยุบตัวของวัสดุ เมื่อมีแรงกระทำซ้ำตามมาตรฐานมาตรฐาน AS 2891.12.1 โดยมีการแบ่งตัวอย่างเป็น 2 ประเภท

- **ประเภทที่ 1 ไม่แช่น้ำ (Unsoaked)** ทำการทดสอบหลังจากการบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7 วัน
- **ประเภทที่ 2 แช่น้ำ (Soaked)** นำตัวอย่างที่บ่มระยะเวลา 7 วัน แช่น้ำเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงก่อน หลังจากนั้นพักก่อนตัวอย่างให้หมาดก่อนทำการทดสอบ

การทดสอบมีลักษณะการให้แรงกระทำซ้ำกับตัวอย่าง ระยะเวลาให้แรง (Load Period) เท่ากับ 0.5 วินาทีและ ระยะเวลาพัก 1.5 วินาที ซึ่งรวมระยะเวลาการทดสอบต่อ 1 รอบ (Pulse Period) 2 วินาที ดังรูปที่ 4-26



รูปที่ 4-26 ลักษณะ Load Pattern ของการทดสอบด้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Dynamic Creep Test)



รูปที่ 4-27 ความสัมพันธ์ระหว่าง Creep Stiffness และเวลาของวัสดุดินปลายตะแกรง

จากรูปที่ 4-27 เมื่อพิจารณา Creep Stiffness ของวัสดุดินปลายตะแกรง พบว่า ผลการทดสอบนั้นแปรปรวนมาก เนื่องจากวิธีการทดสอบนี้จะใช้กับก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต และจากงานวิจัย (Głuchowski & Sas, 2020) พบว่า การสะสมความเครียดในตัวอย่างนั้นจะเกิดขึ้นในช่วง 1,000 รอบแรก ดังนั้นในงานวิจัยจึงนำการค่า Creep Stiffness ที่เวลา 2000 วินาที หรือจำนวนครั้งการให้แรงเท่ากับ 1,000 รอบ ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุแต่ละชนิด ดังตารางที่ 4-17

ตารางที่ 4-17 สรุปผล Creep Stiffness ที่ระยะเวลา 2000 วินาที

## Creep Stiffness at 2,000 sec

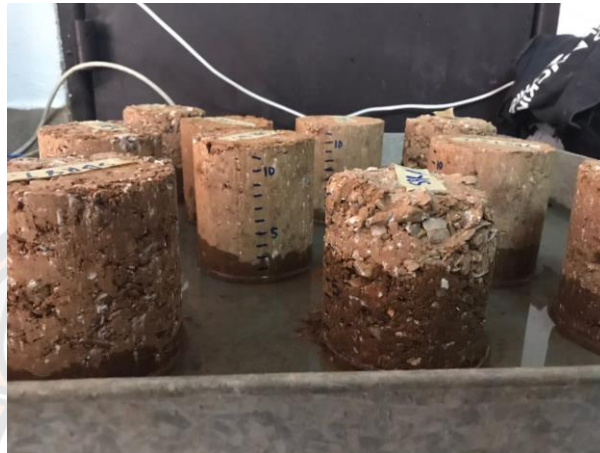
ลำดับ	ประเภทตัวอย่าง	ประเภท ไม่แช่น้ำ (KPa)	ประเภท แช่น้ำ (KPa)
<b>ดินปลายตะแกรง (Quarry by product)</b>			
1	QB	ทดสอบไม่ได้	
2	QB-C	9.67	5.01
3	QB-CSA	22.19	16.62
4	QB-CSBR	14.74	10.41
<b>หินคลุก (Crush rock)</b>			
1	CR	5.23	ทดสอบไม่ได้
2	CR-C	53.50	23.89
3	CR-CSA	29.85	8.92
4	CR-CSBR	34.60	12.31
<b>วัสดุผิวทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement : RAP)</b>			
1	RAP	2.06	ทดสอบไม่ได้
2	RAP-C	12.69	9.71
3	RAP-CSA	11.39	8.58
4	RAP-CSBR	14.05	11.32

เมื่อพิจารณาค่า Creep Stiffness ที่แสดงความสามารถในการต้านทานการเกิด Permanent Deformation ของวัสดุในตารางที่ 4-17 พบว่าเมื่อวัสดุดินปลายตะแกรงปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ (QB-CSA และ QB-CSBR) มีค่า Creep Stiffness มีค่าสูงกว่าวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (QB-C) ซึ่งมีผลตรงกันข้ามกับวัสดุหินคลุก (CR) และวัสดุผิวทางเก่า (RAP) ที่มีค่า Creep Stiffness สูงที่สุดในวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์

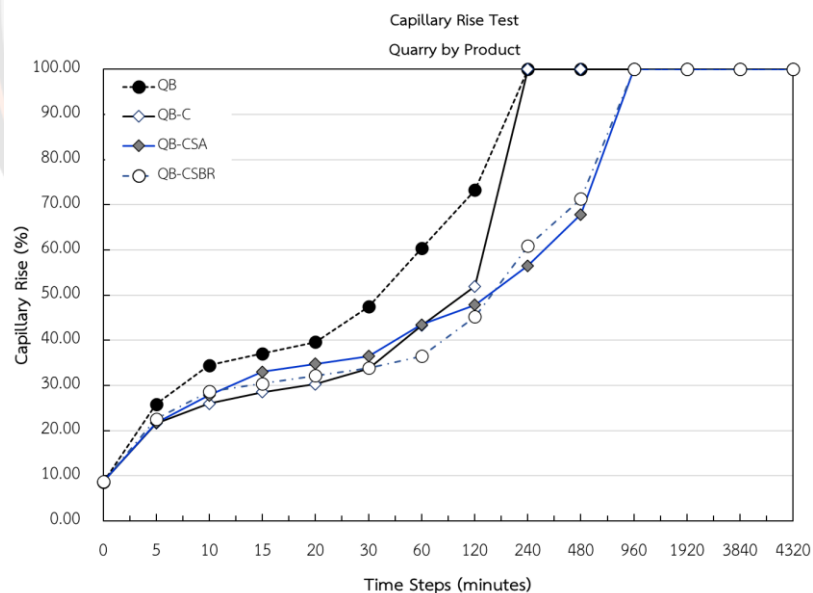
## 4.6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพความทนทานความชื้น

### 4.6.1 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดิน (Capillary Rise Test)

ในการทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดินนั้น จะใช้เวลาในการทดสอบเป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมงหรือเป็นระยะเวลา 4320 นาที และทำการจดบันทึกระยะความสูงของระดับน้ำที่ระยะความสูงต่างๆ

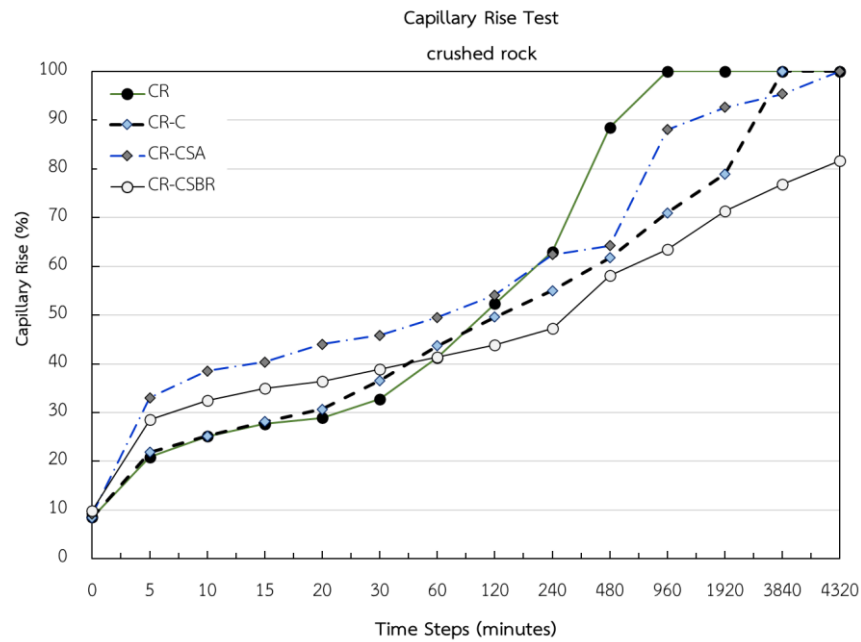


รูปที่ 4-28 การทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดิน



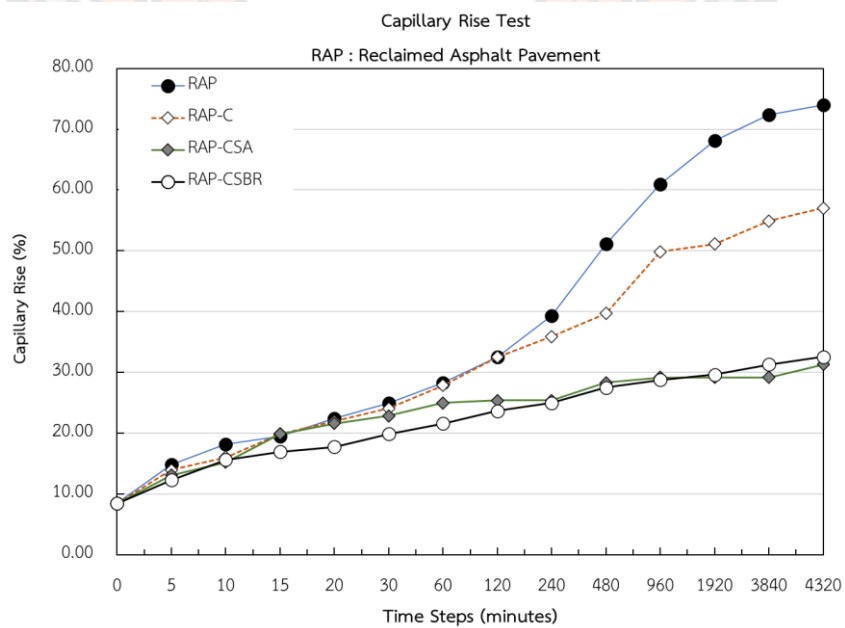
รูปที่ 4-29 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดินของวัสดุดินปลายตะแกรง

จากรูปที่ 4-29 พบว่า วัสดุดินปลายตะแกรง (QB) และวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (QB-C) ใช้เวลาทดสอบเพียง 2 ชั่วโมง (120 นาที) ก่อนตัวอย่างจะมีการพังทลาย แต่เมื่อวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดจะส่งผลให้ระยะเวลาการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-30 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดินของวัสดุหินคลุก

จากรูปที่ 4-30 พบว่า วัสดุหินคลุก (CR) นั้นจะมีอัตราการดูดน้ำจนเต็มก่อนตัวอย่าง โดยใช้ระยะเวลา 16 ชั่วโมง (960 นาที) เมื่อหินคลุกมีการปรับปรุงคุณภาพด้วยพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด นั้นจะส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น และวัสดุหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ (CR-CSBR) มีอัตราการดูดซึมน้ำที่ช้าที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น



รูปที่ 4-31 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดินของวัสดุผิวทางเก่า

เมื่อพิจารณารูปที่ 4-31 พบว่าที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง ก้อนตัวอย่างทุกชนิดมีการดูดซึมน้ำยังไม่เต็มก้อนตัวอย่าง อีกทั้งเมื่อวัสดุผิวทางเก่าปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดจะมีอัตราการดูดซึมน้ำที่ใกล้เคียงกันและช้าที่สุด เมื่อเทียบกับวัสดุผิวทางเก่า (RAP) วัสดุผิวทางเก่าปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (RAP-C)

ตารางที่ 4-18 การเปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวม

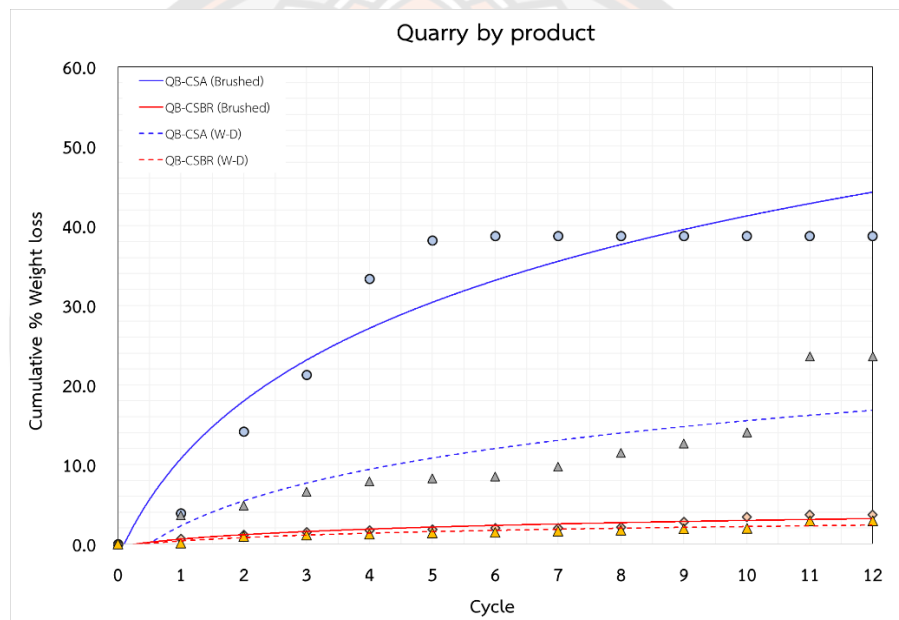
ประเภท	อัตราการดูดซึมน้ำในมวลดิน
วัสดุผิวทางเก่า	ช้า
วัสดุหินคลุก	ปานกลาง
วัสดุดินปลายตะแกรง	เร็ว

จึงสรุปได้ว่า อัตราการดูดซึมน้ำของวัสดุของแต่ละวัสดุมีค่าแตกต่างกัน ดังตารางที่ 4-18 โดยตัวอย่างประเภทวัสดุผิวทางเก่านั้นมีคุณสมบัติในการทนทานความชื้นได้ดีกว่าวัสดุหินคลุก และวัสดุดินปลายตะแกรง อีกทั้งจะเห็นได้ว่าวัสดุมวลรวมทุกชนิดปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์นั้นช่วยส่งผลให้มีอัตราการดูดซึมน้ำที่ช้าลงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และยังแสดงให้เห็นอีกว่าวัสดุมวลรวมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR สามารถลดอัตราการดูดซึมน้ำได้ดีที่สุด

#### 4.6.2 ผลการทดสอบความทนทาน (Durability Test) โดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wetting and drying)

การทดสอบความทนทานของวัสดุนั้น เป็นการจำลองก้อนตัวอย่างในสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยมีการทดสอบทั้งหมด 12 รอบเพื่อเปรียบเทียบร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่างในการทดสอบนั้นได้แบ่งก้อนตัวอย่างเป็น 2 ประเภทได้แก่

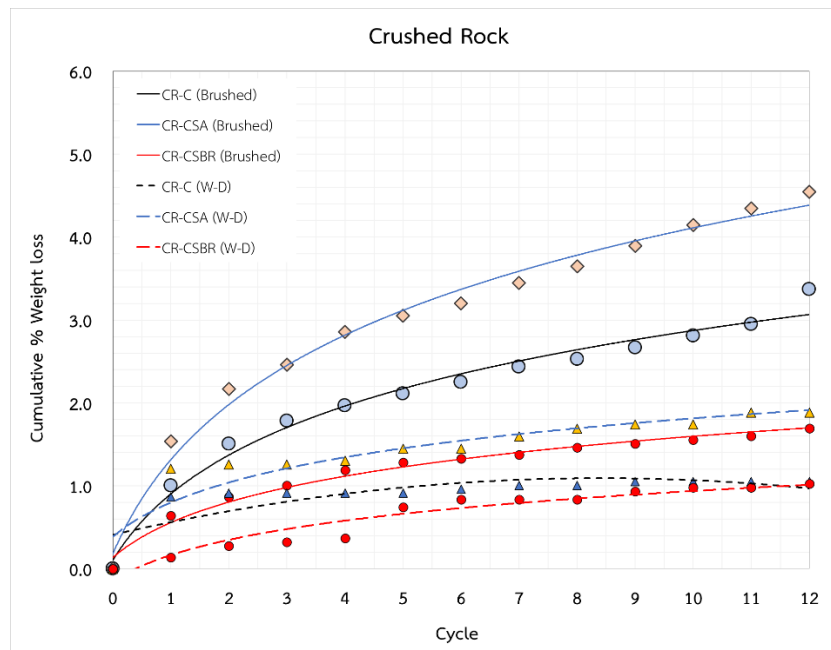
1. ตัวอย่างที่ถูกขัด (Brushed) จะถูกขัดด้วยแปรงลวดรอบตัวอย่าง ประมาณ 20-25 ครั้ง แล้วนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก
2. ตัวอย่างที่ไม่ขัด (W-D) เป็นก้อนตัวอย่างที่จำลองในสภาวะเปียกสลับแห้งเท่านั้น



รูปที่ 4-32 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักและจำนวนรอบของดินปลายตะแกรง

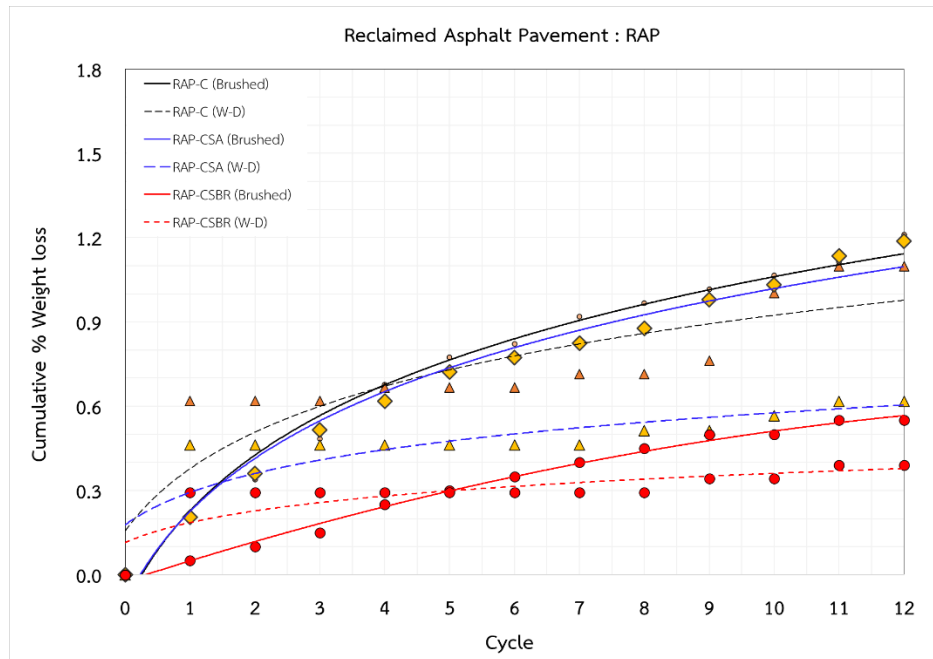
จากรูปที่ 4-30 พบว่า เมื่อวัสดุปลายตะแกรงนั้นปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้งชนิด SA และ SBR ส่งผลให้เพิ่มคุณสมบัติของวัสดุให้มีความทนทานขึ้นเพิ่มขึ้น โดยวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR (QB-CSBR) ทั้งก้อนตัวอย่างชนิดที่ถูกขัด (Brushed) และตัวอย่างที่ไม่ขัด (W-D) มีแนวโน้มเดียวกัน โดยอัตราการร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น อีกทั้งดินปลายตะแกรงปกติ และดินปลายตะแกรงปรับปรุงซีเมนต์นั้น ไม่สามารถทนทานความชื้นทำให้การพังทลายของก้อนตัวอย่างก่อนครบ 12 รอบ





รูปที่ 4-33 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักและจำนวนรอบของหินคลุก

จากรูปที่ 4-33 เมื่อพิจารณาตัวอย่างตัวอย่างที่ถูกขัด (Brushed) และตัวอย่างที่ไม่ขัด (W-D) มีแนวโน้มเดียวกันพบว่าหินคลุกปกติ (CR) นั้นไม่สามารถทนทานความชื้นโดยก้อนตัวอย่างนั้น มีการพังทลาย แต่เมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR (CR-CSBR) ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักนั้นจะมีค่าน้อยที่สุด ส่วนวัสดุหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR (CR-CSBR) นั้นก้อนตัวอย่างสามารถทนทานต่อความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุหินคลุกปกติ อีกทั้งวัสดุหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR (CR-CSBR) ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักนั้นจะมีค่าน้อยที่สุดและวัสดุหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และวัสดุหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ นั้นแสดงให้เห็นว่ามีอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่สูงที่สุด



รูปที่ 4-34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักและจำนวนรอบของวัสดุผิวทางเก่า

จากรูปที่ 3-34 พบว่า วัสดุผิวทางเก่า (RAP) ที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพนั้นพังทลาย พบว่า ตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิดสไตรีนบิวตาไดอิน (RAP-CSBR) นั้นมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น อีกทั้งวัสดุผิวทางเก่าที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (RAP-C) มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักสูงที่สุด โดยมีแนวโน้มเดียวกันทั้งตัวอย่างที่ถูกขัด (Brushed) และตัวอย่างที่ไม่ขัด (W-D)

ตารางที่ 4-19 สรุปอัตราร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุ

ชนิดวัสดุ	ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก					
	ดินปลายตะแกรง		หินคลุก		วัสดุผิวทางเก่า	
	Brushed	W-D	Brushed	W-D	Brushed	W-D
มวลรวมปกติ	พังทลาย		พังทลาย		พังทลาย	
วัสดุมวลรวมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์	พังทลาย		3.37	1.05	1.21	1.10
มวลรวมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ SA	38.72	23.60	4.55	1.89	1.19	0.62
มวลรวมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ SBR	3.69	2.91	1.70	1.03	0.55	0.39

-จากตารางที่ 4-19 พบว่า วัสดุมวลรวมทุกชนิดที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR ทั้งประเภทถูกขัด (Brushed) และตัวอย่างที่ไม่ขัด (W-D) นั้นมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดลง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์

-เมื่อเปรียบเทียบวัสดุทั้ง 3 ชนิดจะพบว่าวัสดุผิวทางเก่า นั้นจะมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าหินคลุกและวัสดุดินปลายตะแกรงที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ทั้งนี้อาจเนื่องจากสาเหตุ (Zhang et al., 2018) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นระหว่าง 46 ถึง 70 องศาเซลเซียส จะทำให้คุณสมบัติการยึดเกาะของแอสฟัลต์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับ (Keawma et al., 2022) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ยางมะตอยที่อยู่ในวัสดุผิวทางเก่า นั้นมีการละลายและเคลือบวัสดุผิวทางเก่า จึงสรุปได้ว่า วัสดุมวลรวมประเภทวัสดุผิวทางเก่า เมื่อผ่านการทดสอบความทนทาน (Durability Test) โดยการผ่านการอบที่อุณหภูมิ 71 องศาเซลเซียส นาน 42 ชั่วโมง นั้นส่งผลให้แอสฟัลต์ในวัสดุผิวทางเก่า นั้นมีการอ่อนตัวจึงเกิดการเชื่อมประสานกับมวลรวม ส่งผลให้คุณสมบัติการยึดเกาะระหว่างมวลรวมดีขึ้น ทำให้วัสดุมีความทนทานเพิ่มขึ้นและอัตราการสูญเสียน้ำหนักลดลง

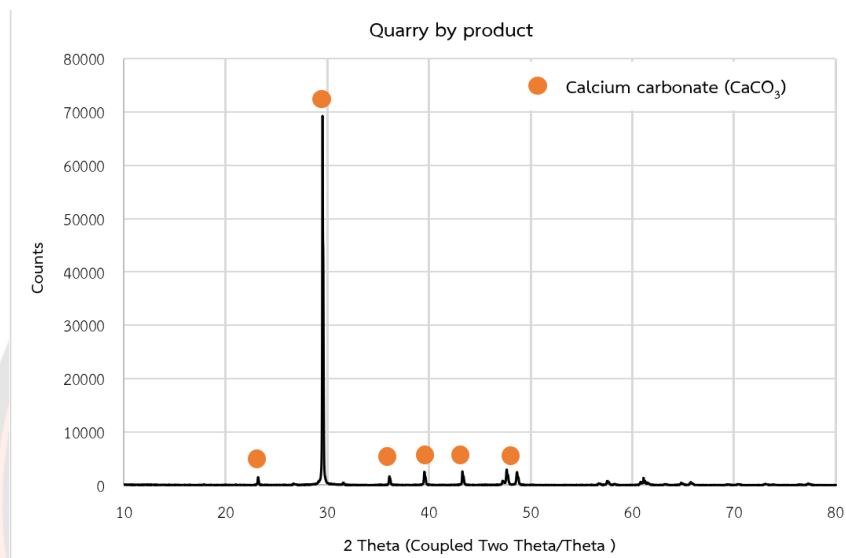


#### 4.6 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลโครงสร้างระดับจุลภาค (Micro structure)

ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค (Micro Structure) ด้วยการทดสอบ 2 วิธีได้แก่ X-ray Diffraction (XRD) และ Scanning electron microscopy (SEM) โดยมีผลการทดสอบดังนี้

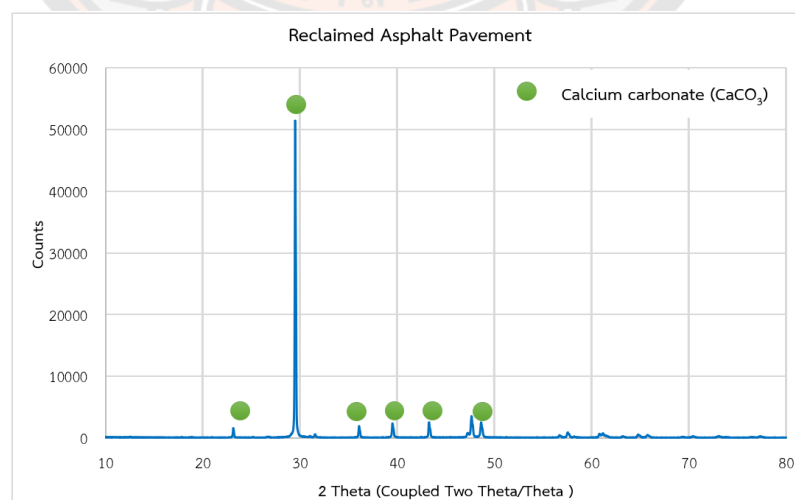
##### 4.6.1 X-ray Diffraction (XRD)

##### 4.6.1 ผลการทดสอบ X-ray Diffraction (XRD) ของวัสดุผสมรวม



รูปที่ 4-35 กราฟแสดงผลการทดสอบองค์ประกอบเคมีด้วยวิธี X-ray Diffraction (XRD)

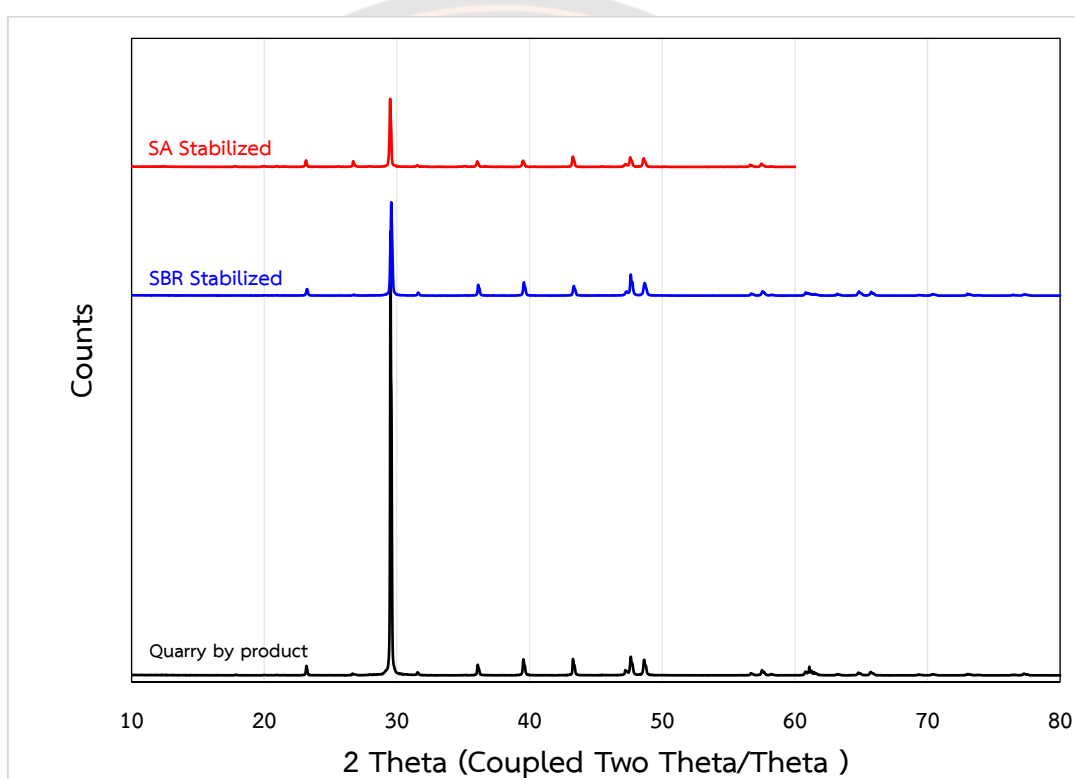
ของวัสดุดินปลายตะแกรง



รูปที่ 4-36 กราฟแสดงผลการทดสอบองค์ประกอบเคมีด้วยวิธี X-ray Diffraction (XRD)

ของวัสดุผิวทางเก่า

จากรูปที่ 4-35 และ 4-36 จากการผลการทดสอบองค์ประกอบเคมีด้วยวิธี X-ray Diffraction (XRD) ของวัสดุดินปลายตะแกรงและวัสดุผิวทางเก่า พบว่า ผลวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าวัสดุทั้ง 2 เป็นประเภทหินปูน ประกอบด้วยแร่ธาตุ Calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) มากกว่าร้อยละ 90 และพบธาตุอื่นๆ ได้แก่ Magnesium (Mg) Silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ ) Aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ปริมาณที่น้อย โดยวัสดุดินปลายตะแกรง และหินคลุกนั้นเป็นหินจากแหล่งโรมเดียวกัน ซึ่งแตกต่างกันเพียงขนาดของเม็ดวัสดุ จึงกล่าวได้ว่ามีแร่ธาตุเหมือนกัน ดังนั้นสรุปได้ว่า วัสดุมวลรวมทั้ง 3 ชนิดนั้นเป็นประเภทหินปูน



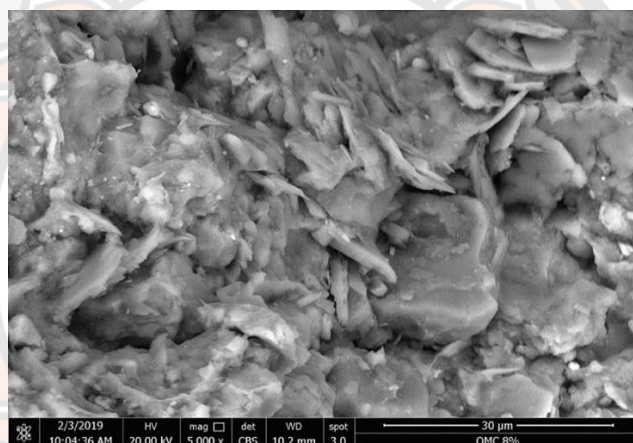
รูปที่ 4-37 กราฟ X-ray diffraction pattern ของวัสดุดินปลายตะแกรง  
ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์

จากรูปที่ 4-37 สำหรับผลการทดสอบองค์ประกอบเคมีด้วยวิธี X-ray Diffraction (XRD) พบว่า เมื่อมีการเติมเมอร์ชนิด SA และ SBR ส่งผลให้พีคการเลี้ยวเบน (diffraction peak) มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเพียงเล็กน้อยโดยเลื่อนมาที่บริเวณ 2 Theta ประมาณ  $28-29^\circ$  ในขณะที่วัสดุดินปลายตะแกรง ประมาณ  $30^\circ$  อีกทั้งการเลี้ยวเบน (diffraction peak) ตำแหน่งอื่นๆเหมือนเดิม ไม่มีการเกิดพีคการเลี้ยวเบน (diffraction peak) ใหม่ ดังนั้นสรุปได้ว่า

เมื่อเติมพอลิเมอร์ชนิดสไตรีนอะคริลิก (SA) และพอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) ลงในวัสดุผสมรวมจะไม่เกิดพันธะทางเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (Iyengar et al., 2013) ไม่มีแร่ธาตุเกิดใหม่จากการเติมพอลิเมอร์ในวัสดุผสมรวม แต่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะการเกาะกลุ่มของอนุภาค

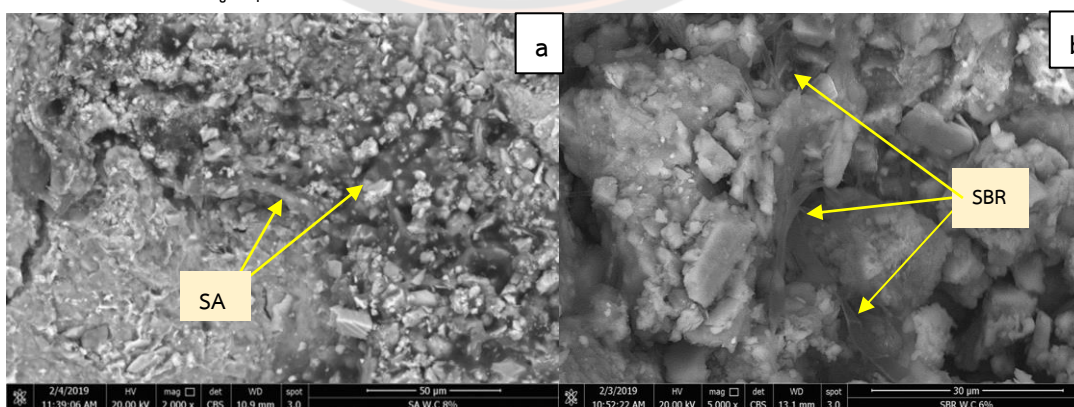
#### 4.6.2 Scanning electron microscopy (SEM)

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการรับแรงของวัสดุแสดงให้เห็นว่า เมื่อปรับปรุงคุณภาพวัสดุดินปลายตะแกรงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรง ซึ่งมีผลแตกต่างจากวัสดุชนิดอื่น ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์ภาพที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่าของวัสดุดินปลายตะแกรง



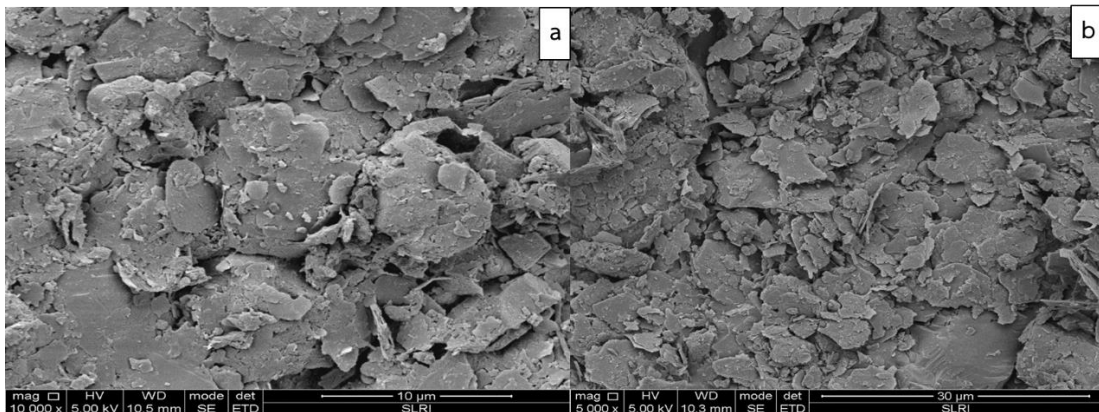
รูปที่ 4-38 ภาพ SEM ของวัสดุดินปลายตะแกรง

จากรูปที่ 4-38 เป็นตัวอย่างวัสดุดินปลายตะแกรง (QB) ลักษณะโครงสร้างดินเกาะกลุ่มเป็นชั้นและพบว่ามีรูพรุนภายในโครงสร้างดินเป็นจำนวนมาก



a) ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ SA b) ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ SBR

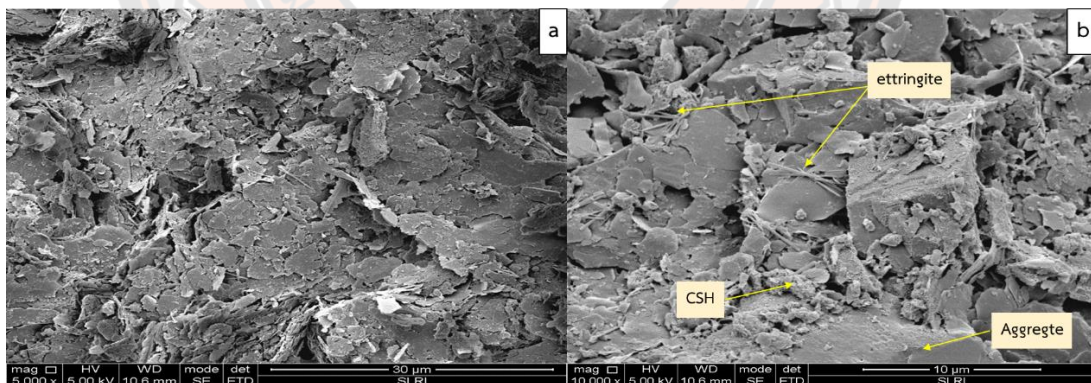
รูปที่ 4-39 ภาพ SEM ของวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยอัตราส่วนพอลิเมอร์:น้ำ (100-0)



a) ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ SA b) ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ SBR

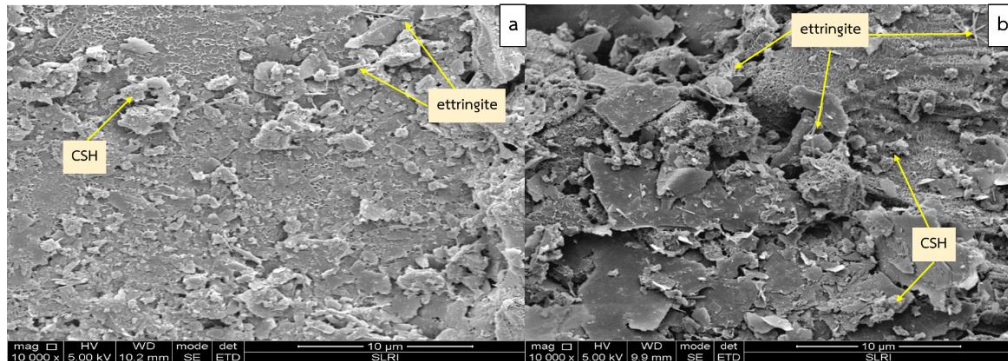
รูปที่ 4-40 ภาพ SEM ของวัสดุหินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยอัตราส่วนพอลิเมอร์:น้ำ (50-50)

วัสดุหินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยอัตราส่วนพอลิเมอร์:น้ำ (100-0) ทั้งชนิด SA และ SBR พบว่า อนุภาคของพอลิเมอร์ได้เข้าไปแทรกตัวและเคลือบอนุภาคของมวลหิน ดังรูป 4-39 แต่เมื่อวัสดุปรับปรุงด้วยอัตราส่วนพอลิเมอร์:น้ำ (50-50) ทั้งชนิด SA และ SBR ที่ปริมาณพอลิเมอร์ถูกเจือจางนั้นจะไม่พบเส้นใยอนุภาคของพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 4-40 ทั้งนี้ผลการทดสอบ XRD ชี้ให้เห็นว่าไม่เกิดพันธะทางเคมีหรือการเปลี่ยนทางเคมี จึงกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดเคลือบและแทรกตัวในอนุภาคหินทำหน้าที่คล้ายกาวเพื่อช่วยในการยึดเกาะอนุภาคของหิน



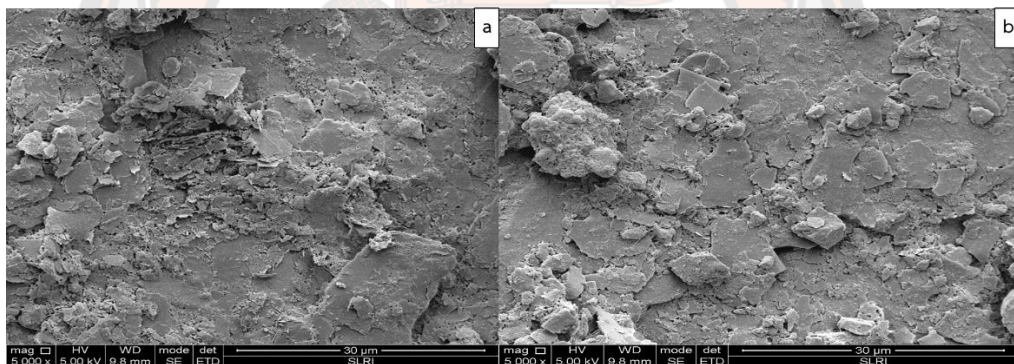
a) ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ร้อยละ 1 b) ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ร้อยละ 2

รูปที่ 4-41 ภาพ SEM ของวัสดุหินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่อายุป่ม 7 วัน

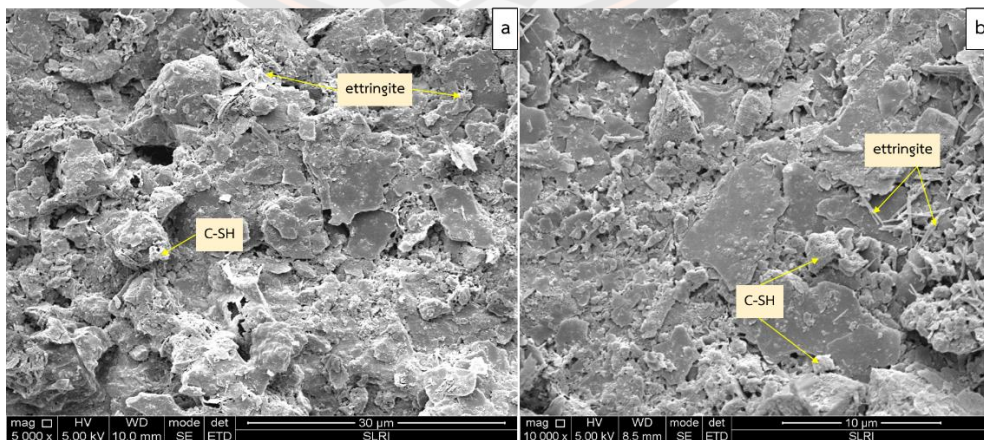


a) ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ร้อยละ 1 b) ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ร้อยละ 2  
รูปที่ 4-42 ภาพ SEM ของวัสดุหินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่อายุบ่ม 28 วัน

จากรูปที่ 4-41 และ 4-42 พบว่า เมื่อเติมซีเมนต์ลงในวัสดุมวลรวมนั้น การพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปริมาณสารประกอบ Ettringite และ CSH มีเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์และระยะเวลาการบ่ม



a) ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA b) ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR  
รูปที่ 4-43 ภาพ SEM ของวัสดุหินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ที่อายุบ่ม 7 วัน



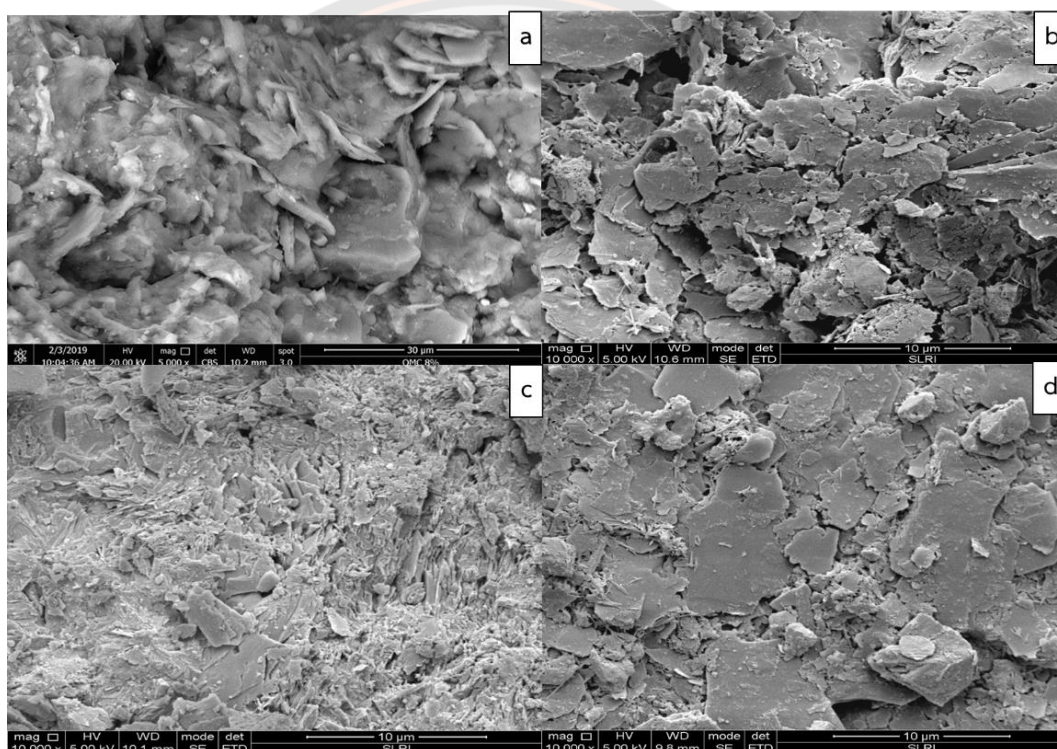
a) ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA b) ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR  
รูปที่ 4-44 ภาพ SEM ของวัสดุหินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ที่อายุบ่ม 28 วัน



จากรูปที่ 4-43 พบว่า เมื่อเติมพอลิเมอร์ชนิด SA และ SBR ลงวัสดุมวลรวมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ มีการพัฒนาปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับรูปที่ 4-36 b) ที่เป็นวัสดุปรับปรุงเฉพาะซีเมนต์

อีกทั้ง รูปที่ 4-44 แสดงให้เห็นว่า เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 28 วัน ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดมากกว่ารูปที่ 4-43 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

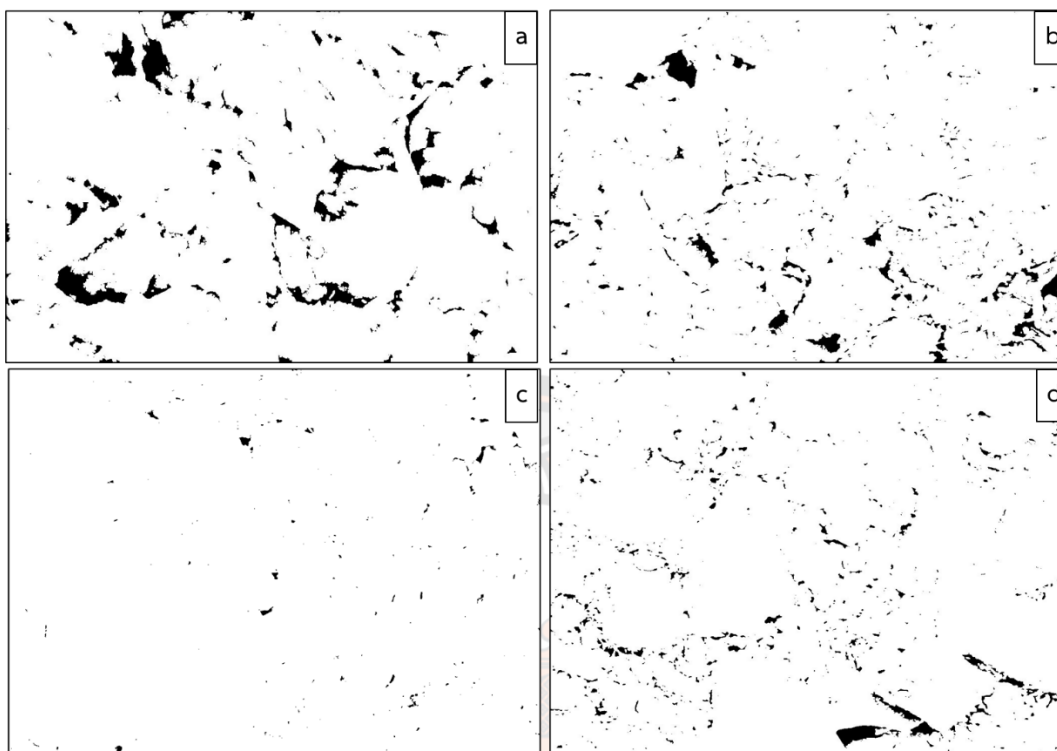
#### 4.7 พฤติกรรมทางวิศวกรรมและโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุมวลรวมและวัสดุเชื่อมประสาน



a) ดินปลายตะแกรง 1 b) ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ร้อยละ 2  
c) ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ SA d) ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ SBR

รูปที่ 4-45 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุดินปลายตะแกรง

จากการศึกษายังพบว่าการกระจายของช่องว่างของวัสดุแตกต่างกันในแต่ละประเภทตัวอย่าง ทั้งนี้จึงได้นำภาพ SEM (รูปที่ 4-45) มาวิเคราะห์ปริมาณพื้นที่และขนาดของช่องว่างภายในตัวอย่างวัสดุที่ได้จากภาพ SEM ด้วยโปรแกรม Image J เป็นซอฟต์แวร์ฟรีที่ใช้ Java ในการวิเคราะห์ภาพ ได้รับความนิยมในการใช้วิเคราะห์ข้อมูลในหลายๆงานวิจัย (A.G et al., 2021) วิธีการดังกล่าวพบว่าง่ายและเชื่อถือได้ เหมาะกับการวิเคราะห์ตัวอย่างขนาดเล็ก โดยจุดสีดำนั้นแสดงถึงพื้นที่ช่องว่างที่นำมาวิเคราะห์ดังรูปที่ 4-46



a) ดินปลายตะแกรง b) ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ร้อยละ 2  
c) ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ SA d) ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ SBR

รูปที่ 4-46 การวิเคราะห์พื้นที่ช่องว่างของตัวอย่าง

ตารางที่ 4-20 สรุปข้อมูลการวิเคราะห์พื้นที่ช่องว่างของตัวอย่าง

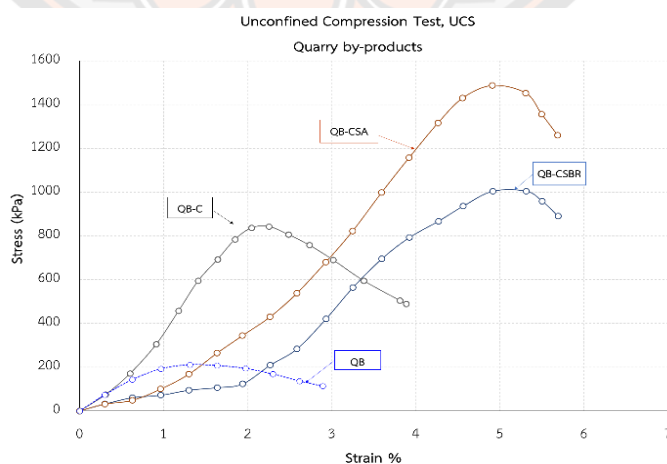
Type	Count	Total Area $\mu\text{m}^2$	Average size $\mu\text{m}^2$	Area (%)	Perimeter $\mu\text{m}$
QB	364	218.879	0.601	5.63	2.527
QB-C	684	28.046	0.041	3.666	0.634
QB-CSA	249	3.079	0.012	0.404	0.362
QB-CSBR	824	19.047	0.023	2.539	0.498

จากตารางที่ 4-20 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมวัสดุเชื่อมประสานซีเมนต์พอลิเมอร์ SA และ SBR ลงในวัสดุดินปลายตะแกรงที่มีมวลละเอียด (ปริมาณผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ร้อยละ 17.20) จะทำให้ปริมาณพื้นที่ช่องว่าง (Total Area) ลดลง โดยซีเมนต์พอลิเมอร์นั้นจะเข้าไปแทรกในช่องว่างทำให้ขนาดช่องว่างเฉลี่ย (Average size) มีขนาดที่เล็กลง ส่งผลให้อุณหภูมิของดินมีการยึดเกาะที่ดีขึ้น

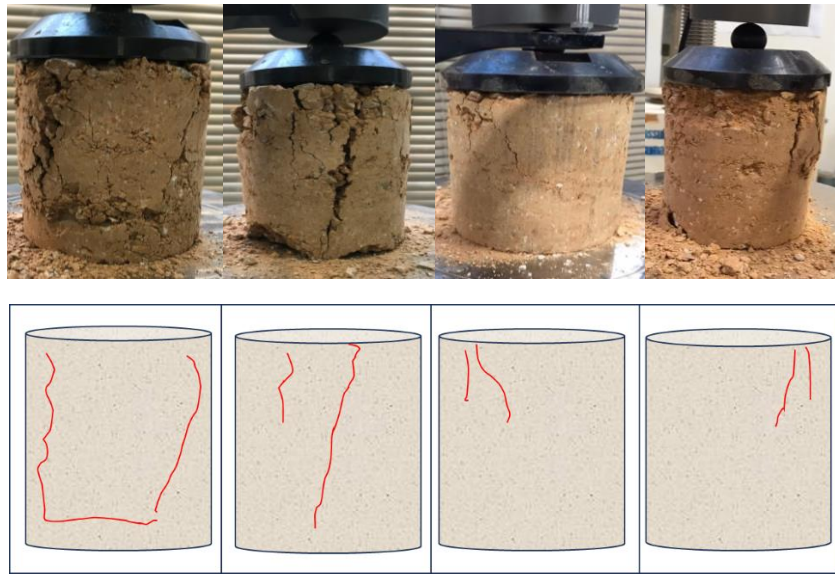
เมื่อเปรียบเทียบกับ วัสดุดินปลายตะแกรง (QB) กับวัสดุดินปลายตะแกรงที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (QB-C) ในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาของ Site Onyejekwe (2014) พบว่าการเพิ่มสารเพื่อปรับปรุงนั้นจะส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคแน่นขึ้นกว่าดินที่ไม่ได้ทำการปรับปรุง

พิจารณาการใช้งานระยะสั้น (Short Term) เมื่อปริมาณช่องว่างของวัสดุลดลง Jeb Tingle (2007) โดยอนุภาคดินที่ถูกเคลือบด้วยพอลิเมอร์นั้นจะเพิ่มการรวมตัวของอนุภาคดินได้ดีกว่าดินปกติ ส่งผลให้ดินแน่นและสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรง (UCS) ดังรูปที่ 4-47 ที่พบว่า เมื่อปรับปรุงซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA และ SBR ในดินปลายตะแกรงที่มีมวลละเอียด (ปริมาณผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ร้อยละ 17.20) จะส่งผลให้กำลังรับแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ QB และ QB-C ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณช่องว่างในมวลรวมลดลง

อีกทั้งยังพบว่าลักษณะการวิบัติตัวอย่างมีลักษณะที่แตกต่างกัน (Hatibu & Hettiaratchi, 1993) โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้ ลักษณะเนื้อดิน ปริมาณความชื้น ความเค้นรอบตัวอย่าง และลักษณะการประสานในโครงสร้างจุลภาค จาก รูปที่ 4-47 a) ตัวอย่างดินปลายตะแกรงระนาบการวิบัติที่ขึ้นเกิดขึ้นหลายแนวมีขนาดกว้างและเชื่อมต่อกันรอบตัวอย่างทดสอบ รูปที่ 4-47 b) ลักษณะวิบัติเป็นรอยเฉือน (shear fracture) ขนาดกว้างแนวทแยงเชื่อมจากด้านบนถึงด้านล่างของตัวอย่าง (Patel & Singh, 2017) ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมเปราะของวัสดุ (Brittle Failure) รูปที่ 4-47 c) นั้นปรากฏรอยแยกเล็กน้อยบริเวณด้านบนของตัวอย่างในแนวตั้งขนานกับทิศทางที่ให้แรง



รูปที่ 4-47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินปลายตะแกรง



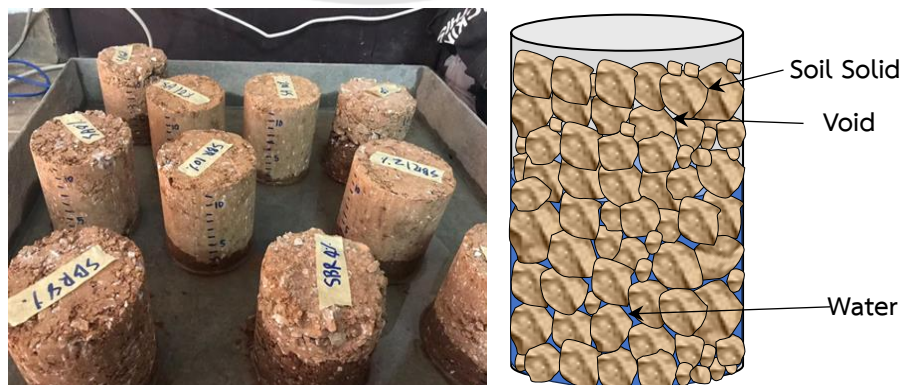
รูปที่ 4-48 ระยะเวลาการวิบัติของวัสดุดินปลายตะแกรงของตัวอย่างจากการทดสอบ UCS

ประเภทไม่แช่น้ำ

a) ดินปลายตะแกรง 1 b) ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ร้อยละ 2

c) ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ SA d) ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ SBR

- นอกจากดินปลายตะแกรงปรับปรุงซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดจะเพิ่มประสิทธิภาพกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดึงในผลการทดสอบข้างต้นแล้ว เมื่อการยึดเกาะระหว่างอนุภาคดินที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณช่องว่าง (Void) ภายในวัสดุมีขนาดเล็กลง ช่วยลดผลกระทบจากความชื้น ดังรูปที่ 4 48 ส่งผลให้การดูดซึมน้ำในมวลดินลดลง อีกทั้งเมื่อตัวอย่างอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง ช่วยลดการสูญเสียน้ำหนักของดิน ทำให้ตัวอย่างมีความทนทานต่อความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ QB และ QB-C จึงส่งผลให้ช่วยยืดอายุการใช้งานในระยะยาว (Long Term)



รูปที่ 4-49 ภาพและแบบจำลองทดสอบดูดซึมน้ำในมวลดิน

#### 4.8 ผลการศึกษาความเหมาะสมในการก่อสร้างของวัสดุงานทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์

ตารางที่ 4-21 สรุปผลความเหมาะสมในการก่อสร้างของวัสดุมวลรวม

ประเภทวัสดุ	ความเหมาะสมในการก่อสร้าง
ดินปลายตะแกรง	ดินถมคันทาง
หินคลุก	ชั้นพื้นทางหินคลุก
วัสดุผิวทางเก่า	ชั้นรองพื้นทาง

จากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ นั้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-21 พบว่า วัสดุดินปลายตะแกรงมีความเหมาะสมในการก่อสร้างเป็นชั้นดินถมคันทาง วัสดุหินคลุกมีความเหมาะสมในการก่อสร้างชั้นพื้นทางหินคลุก และวัสดุผิวทางเก่ามีความเหมาะสมในการก่อสร้างชั้นรองพื้นทาง

ตารางที่ 4-22 สรุปผลความเหมาะสมในการก่อสร้างของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์

ประเภทวัสดุ	มาตรฐานกรมทางหลวง			ความเหมาะสมในการก่อสร้าง
	ผลการทดสอบ	ทล.-ม	ทล.-ม	
	UCS - 7 day (KPa)	203/2556	204/2564	206/2564
QB-CSA	1,006	> 2,413 KPa	> 1,724 KPa	> 689 KPa
QB-CSBR	915			
CR-CSA	718			
CR-SBR	720			
RAP-CSA	718			
RAP-CSBR	720			
ทล.-ม. 203/2556 มาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์				
ทล.-ม 204/2556 มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์				
ทล.-ม. 206/2556 มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์				

จากตารางที่ 4-22 เมื่อเปรียบเทียบมาตรฐานกรมทางหลวงนั้นได้กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดจากตัวอย่างที่ผ่านการบ่ม 7 วันและแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนการทดสอบและเปรียบเทียบผลการทดสอบจากกลุ่มตัวอย่างแช่น้ำ (Soaked) พบว่า วัสดุมวลรวมทั้ง 3 ชนิดเมื่อปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ SA และ SBR มีความเหมาะสมในการก่อสร้างเป็นชั้นรองพื้นทาง ทั้งนี้วัสดุหินคลุกและวัสดุผิวทางเก่า ได้มีการกำหนดร้อยละซีเมนต์ที่ 2 เพื่อใช้ในการศึกษาแนวโน้มการพัฒนา

กำลังรับแรงอัดของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ จึงควรมีการออกแบบบร้อยละปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมของแต่ละวัสดุ

#### 4.9 ผลกระทบจากการใช้งานจริงตามข้อกำหนดการออกแบบชั้นพื้นทางและรองพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวง



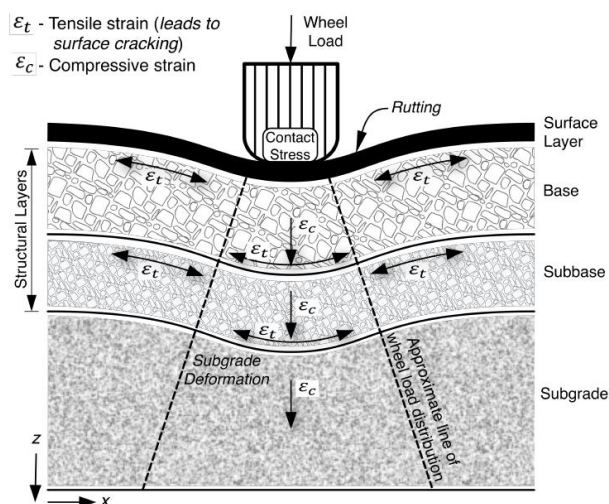
รูปที่ 4-50 ชั้นโครงสร้างของถนน

โครงสร้างชั้นทางของถนนประกอบด้วยโครงสร้างสำคัญดังนี้ ชั้นผิวทาง (Surface course) ชั้นพื้นทาง (Base course) ชั้นรองพื้นทาง (Subbase course) ชั้นดินคั่นทาง (Subgrade) ดังรูปที่ 4-50 โดยหน้าที่หลักคือรับแรงจากชั้นผิวถนนและกระจายสู่ชั้นอื่นๆ โดยการเรียงตัวของแต่ละชั้น จะคล้ายคลึงกันทั้งในและต่างประเทศแต่ข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบและก่อสร้างนั้นแตกต่างกัน

ประเทศไทยประเทศไทยได้กำหนดคุณสมบัติของกำลังรับแรงของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์เพียง 1 ประเภทคือ กำลังรับแรงอัด (UCS) จากตัวอย่างที่ทำการบ่มเป็นเวลา 7 วัน เป็นวิเคราะห์และออกแบบโดยวิธีเอ็มพีริคัล (Empirical method) ซึ่งอาศัยประสบการณ์และวิธีการทดสอบอย่างง่ายเป็นข้อกำหนด ซึ่งถนนที่ออกแบบด้วยวิธีดังกล่าวนี้พบว่ามีความอายุการใช้งานที่สั้นกว่าการออกแบบ มีความเสียหายจากการใช้งานทำให้มีการซ่อมแซมอยู่บ่อยครั้ง

ซึ่งในปัจจุบันนั้นการออกแบบด้วยวิธีเมคานิสติก (Mechanistic Method) เป็นการออกแบบแนวใหม่ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีที่สอดคล้องกับการวิบัติ อีกทั้งปรับปรุงการพิจารณาหน่วยแรงชั้นทางดังรูปที่ 4-51 ที่มีการพิจารณาหน่วยแรงอัด และหน่วยแรงดึงและมีข้อกำหนดการก่อสร้างเพิ่มเติม เช่น

ในสหราชอาณาจักร จำแนกประเภทวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างชั้นทาง ของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (CBGM) ด้วยคุณสมบัติของวัสดุดังนี้ กำลังรับแรงอัด (compressive strength ) กำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) และ Modulus of Elastic (Nusit, 2016)



รูปที่ 4-51 หน่วยแรงในโครงสร้างชั้นทาง  
 (ที่มา Bowman and Haigh (2019) )

อีกทั้งสาธารณรัฐแอฟริกาใต้ นั้นแนะนำข้อกำหนดพื้นฐานสำหรับโครงสร้างชั้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ โดยมีการจำแนกประเภทเป็น 4 กลุ่มตัวอย่างประกอบด้วย C1 C2 C3 และ C4 เป็นโดยใช้กำลังรับแรงอัด UCS และค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS) ดังตารางที่ 4-23

ตารางที่ 4-23 การจำแนกโครงสร้างชั้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์สาธารณรัฐแอฟริกาใต้ (Transport, 1986) และ (Jenkins, 2006) อ้างอิงจาก (Yeo, 2011)

Classification	UCS - 7 day at	UCS - 7 day at	Minimum	Typical
	100% MDD (MPa)	97% MDD (MPa)	IDT (Kpa)	Material Used
C1	6-12	4-8	N/A	Crushed Stone
C2	3-6	2-4	N/A	Stone / Gravel
C3	1.5-3	1-2	200	Gravel
C4	0.75-1.5	0.5-1	120	Gravel

เมื่อเปรียบเทียบเกณฑ์ของแนะนำขั้นต่ำของกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile Strength, IDT) ดังกล่าวกับผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมพบว่า ในวัสดุดินปลายตะแกรง และวัสดุผิวทางเก่าที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดนั้น ค่า IDT นั้นมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำแนะนำ มีเพียงวัสดุหินคลุกที่ผลการทดสอบ IDT นั้นไม่ผ่านตามข้อแนะนำดังกล่าวทั้งนี้ วัสดุหินคลุกนั้นสามารถรับแรงอัดได้ดีจึงส่งผลให้สามารถรับดึงได้น้อย

ตารางที่ 4-24 เปรียบเทียบเกณฑ์และผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม

ประเภทตัวอย่าง	UCS - 7 day at 97% MDD (Mpa)	IDT (KPa)	Classification
<b>ดินปลายตะแกรง (Quarry by product)</b>			
QB-C	0.5	189.7	C4
QB-CSA	1.0	223.2	C3
QB-CSBR	0.9	241.8	C4
<b>หินคลุก (Crush rock)</b>			
CR-C	2.0	153	ผลการทดสอบ ITS ไม่ผ่าน ตามข้อแนะนำ
CR-CSA	0.7	93	
CR-CSBR	1.2	172	
<b>วัสดุผิวทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement : RAP)</b>			
RAP-C	1.0	310	C3
RAP-CSA	0.7	206	C4
RAP-CSBR	0.7	329	C3

กำลังรับแรงดัด (flexural strength) หรือ โมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture, MOR) คือค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อมของตัวอย่างประเภทคานที่ได้จากการทดสอบแรงดัดแบบ 3 จุด (Three-Points Bending) (Nusit, 2016) จากงานวิจัยของ (Powell et al., 1984) กล่าวว่า กำลังรับแรงดัด (flexural strength) เป็นตัวบ่งชี้ความต้านทานต่อการแตกร้าวตามแนวยาว ดังนั้น หลักเกณฑ์การออกแบบตามมาตรฐานกรมทางหลวงในปัจจุบันนั้นควรพิจารณาข้อหนดประสิทธิภาพกำลังรับแรงในด้านอื่นๆ เช่น กำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) เป็นข้อกำหนดการออกแบบเพิ่มเติม เพื่อให้อายุการใช้งานจริงใกล้เคียงกับอายุถนนจากการออกแบบ



## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัย (1) เพื่อประเมินพฤติกรรมภายในโครงสร้างระดับจุลภาค (Micro structure) ของมวลรวมที่มีการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ (2) เพื่อประเมินอัตราส่วนผสมที่ส่งผลกับประสิทธิภาพทางวิศวกรรมในด้านกำลังรับแรงของมวลรวมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ (3) เพื่อประเมินประสิทธิภาพในด้านความคงทนความชื้นของมวลรวมที่มีการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ ผลงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

#### 5.1 ประเมินพฤติกรรมภายในโครงสร้างระดับจุลภาค (Micro structure) ของมวลรวมที่มีการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์

- วัสดุมวลรวมทั้ง 3 ชนิดประกอบด้วย ดินปลายตะแกรง (Quarry by Product) หินคลุก (Crushed rock) วัสดุผิวทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement , RAP) จากผลการทดสอบ X-ray Diffraction (XRD) พบว่าเป็นวัสดุหินปูน ประกอบด้วยแร่ธาตุ Calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) มากกว่าร้อยละ 90 และพบธาตุอื่นๆ ได้แก่ Magnesium (Mg) Silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ ) Aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ปริมาณที่น้อย
- เมื่อปรับปรุงวัสดุงานทางด้วยพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดได้แก่ พอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก (SA) และพอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) จากผลการทดสอบ X-ray Diffraction (XRD) พบว่าไม่เกิดพันธะทางเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี
- ผลการทดสอบ Scanning electron microscopy (SEM) พบว่า พอลิเมอร์เคลือบและแทรกตัวในอนุภาคดินทำหน้าที่คล้ายกาว ช่วยในการยึดเกาะอนุภาคเพิ่มการรวมตัวของอนุภาคดินได้ดีกว่าดินปกติส่งผลให้ดินแน่น และปริมาณช่องว่างของวัสดุลดลง
  - วัสดุมวลรวมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ การพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ และระยะเวลาการบ่ม
  - วัสดุมวลรวมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด ปริมาณ Ettringite และ CSH นั้นพบน้อยกว่าวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์

#### 5.2 ประเมินอัตราส่วนผสมที่ส่งผลกับประสิทธิภาพทางวิศวกรรมในด้านกำลังรับแรงของมวลรวมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์

- วัสดุดินปลายตะแกรงมีความเหมาะสมในการก่อสร้างเป็นชั้นดินถมคันทาง วัสดุหินคลุกมีความเหมาะสมในการก่อสร้างชั้นพื้นทางหินคลุก และวัสดุผิวทางเก่ามีความเหมาะสมในการก่อสร้างชั้นรองพื้นทาง

- จากการออกแบบอัตราส่วนผสมของเหลวที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density, MDD) และปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content , OMC ) ประกอบด้วยพอลิเมอร์ : น้ำ (ร้อยละ 100: 0) นั้นจะพบว่า พอลิเมอร์กระจายตัวในเนื้อดินไม่ดี ส่งผลให้ดินจับตัวเป็นก้อน ซึ่งอัตราส่วนผสมเหมาะสมที่สุดของงานวิจัยคือ พอลิเมอร์ : น้ำ (ร้อยละ 50:50)
- วัสดุมวลรวมทั้ง 3 ชนิดเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density, MDD) เพิ่มสูงขึ้น และปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content ,OMC ) ลดลง แต่วัสดุมวลรวมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ ทั้ง 2 ชนิดนั้นกลับมีค่า MDD ที่ต่ำลง มีเพียงหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ SBR (CR-CSBR) ที่มี MDD ที่ใกล้เคียงกับหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (CR-C) ส่วนปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content ,OMC) ของวัสดุดินปลายตะแกรงมีค่ามากที่สุดเนื่องจากมีขนาดวัสดุเม็ดละเอียดมากกว่าวัสดุอื่นๆ
- ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) และ กำลังต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Creep) พบว่า หินคลุก (CR) และ วัสดุผิวทางเก่า (RAP) ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ SA และ SBR ไม่มีช่วยในการพัฒนากำลังรับแรง มีเพียงวัสดุดินปลายตะแกรง (QB) ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์จะมีกำลังรับแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์จับตัวได้ดีกับดินเม็ดละเอียด ส่งผลให้ช่องว่างในดินลดลงและรับแรงได้ดีขึ้น
- ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (IDT) พบว่า วัสดุมวลรวมทั้ง 3 ชนิดเมื่อปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ SBR มีส่วนช่วยในการเพิ่มกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (IDT) ส่วนซีเมนต์พอลิเมอร์ SA นั้นไม่มีส่วนช่วยในการเพิ่มกำลังรับแรงดึง

### 5.3 ประเมินประสิทธิภาพในด้านความคงทนความชื้นของมวลรวมที่มีการปรับปรุง

#### ด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์

- ผลการทดสอบดูดซึมน้ำในมวลดิน (Capillary Rise Test) ซึ่งให้เห็นว่า วัสดุมวลรวมทั้ง 3 ชนิดเมื่อปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้งชนิด SA และ SBR นั้นมีการช่วยลดช่องว่างในมวลดิน ส่งผลให้อัตราการดูดซึมน้ำที่ลดลง
- ผลการทดสอบความทนทาน (Durability Test) โดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wet-dry) แสดงให้เห็นว่า วัสดุมวลรวมทั้ง 3 ชนิดเมื่อปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR นั้นมีส่วนช่วยในการยึดเกาะส่งผลให้อัตราการสูญเสียน้ำหนักที่ลดลง ซึ่งตรงข้ามกับซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA ที่ไม่มีส่วนช่วยในการลดอัตราการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุ

### ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

- การก่อสร้างโครงสร้างชั้นทาง และรองพื้นทางด้วยอัตราส่วนผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ ควรมีศึกษาเพื่อประเมินความคุ้มค่าในการก่อสร้างเพิ่มเติม

- ผลการทดสอบต้านทานการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Dynamic Creep Test) นั้นเป็นการประยุกต์ใช้ในการทดสอบการปรับปรุงโครงสร้างชั้นทาง ซึ่งการทดสอบนี้จะใช้กับก้อนตัวอย่าง แอสฟัลต์คอนกรีต จึงมีการแปรปรวนของผลการทดสอบข้อมูล แนะนำให้เพิ่มจำนวนของตัวอย่างในการทดสอบและกำหนดค่าแรงกระทำ (Test stress) น้อยกว่าร้อยละ 20 ของกำลังรับแรงอัด (UCS) ซึ่งอยู่ในช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit)



## บรรณานุกรม

- A. Maghchiche, A. H., B. Immirzi. (2018). Use of polymers and biopolymers for water retaining and soil stabilization in arid and semiarid regions. *Journal of Taibah University for Science*, 4(1), 9-16. [https://doi.org/10.1016/s1658-3655\(12\)60022-3](https://doi.org/10.1016/s1658-3655(12)60022-3)
- A.G, S., Heeralal, M., & T, T. (2021). Soil Shrinkage Characterization of Low Plasticity Soil Using Digital Image Analysis Process. *International Journal of Engineering*, 34, 2206-2212. <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.10a.02>
- Ahmed, L. (2019). *Sandy Soil Stabilization with Polymer - Copy*.
- Board, T. R., National Academies of Sciences, E., & Medicine. (2014). *Characterization of Cementitiously Stabilized Layers for Use in Pavement Design and Analysis*. The National Academies Press. <https://doi.org/doi:10.17226/22247>
- Bowman, A. J., & Haigh, S. K. (2019). Subsurface deformation mechanisms beneath a flexible pavement using image correlation. *Géotechnique*, 69(7), 627-637. <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.P.092>
- Fauziah Ahmad, M. A. B. M. I., Yahya Atemimi. (2013). Evaluation the effects of styrene butadiene rubber addition as a new soil stabilizer on geotechnical properties. *Research Gate*.
- Głuchowski, A., & Sas, W. (2020). Long-Term Cyclic Loading Impact on the Creep Deformation Mechanism in Cohesive Materials. *Materials*, 13(17), 3907. <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/17/3907>
- Hatibu, N., & Hettiaratchi, D. R. P. (1993). The Transition From Ductile Flow to Brittle Failure in Unsaturated Soils. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 54(4), 319-328. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/jaer.1993.1024>
- Ismail, M. S. B. A., Mehdi Pour Asghar, Fendereski, h., & Sadeghi, M. (2017). Measuring the effects of styrene butadiene copolymer latex-Portland cement additives on properties of stabilized soil-aggregate base. *ScienceDirect*.
- Iyengar, S. R., Masad, E., Rodriguez, A. K., Bazzi, H. S., Little, D., & Hanley, H. J. M. (2013). Pavement Subgrade Stabilization Using Polymers: Characterization and Performance. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(4), 472-483.

[https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000612](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000612)

- Jeb Tingle, J. N., Steven Larson, Charles Weiss, John Rushing,. (2007). Stabilization Mechanisms of Nontraditional Additives. *Transportation Research Record*, 1989, 59-67. <https://doi.org/10.3141/1989-49>
- Jirayut Suebsuk, & Agakaradate Siriphan. (2017). Effects of Wetting and Drying Cycles on Strength of Cement Stabilized Lateritic Soil as Base Course Material. *Engineering Journal Chiang Mai University*.
- Keawma, P., nusit, k., Khumkud, N., Chitsangiam, P., Pra-ai, S., Chidburee, P., & Chaiprakaikeow, S. (2022). The Temperature Effects on the Performance of Road Subbase Material Produced from Recycled Asphalt Pavement. *The 27th National Convention on Civil Engineering*, 27(0). <https://conference.thaince.org/index.php/ncce27/article/view/1403>
- Khumkud, N. (2023). *Laboratory assessment for long-term performance and durability of cement-polymer stabilized road base* Naresuan University]. Naresuan University.
- Nusit, K. (2016). *Development of an Advanced Fatigue Model of a Cement-Treated Base Material Based on Continuum Damage Mechanics* Curtin University]. Curtin University.
- P. Indiramma, C. S., S. Needhidasan. (2019). Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment. *ScienceDirect*.
- Patel, S. K., & Singh, B. (2017). Strength and Deformation Behavior of Fiber-Reinforced Cohesive Soil Under Varying Moisture and Compaction States. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(4), 1767-1781. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0207-y>
- Powell, W. D., Transport, & Road Research, L. (1984). *The Structural design of bituminous roads*. Transport and Road Research Laboratory Crowthorne, Berkshire.
- Prabir K. Kolay, B. D., Sanjeev Kumar, Vijay K. Puri. (2016). Effect of Liquid Acrylic Polymer on Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils. *CrossMark*.
- Site Onyejekwe, G. G. (2014). Soil stabilization using proprietary liquid chemical stabilizers: sulphonated oil and a polymer. *Bulletin of Engineering Geology and*

*the Environment*, 74, 651-665. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0667-8>

Suksun Horpibulsuk, R. R., Avirut Chinkulkijniwat, Yuttana Raksachon, Apichat Suddeepong. (2010). Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. *Construction and Building Materials*, 24(10), 2011-2021.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.011>

Transport, D. o. (1986). *Cementitious stabilizers in road construction*. Dept. of Transport Pretoria, South Africa.

Yeo, Y. S. (2011). *Characterisation of cement-treated crushed rock basecourse for Western Australian roads* [Curtin University]. Curtin University.

Zhang, R., You, Z., Wang, H., Chen, X., Si, C., & Peng, C. (2018). Using bio-based rejuvenator derived from waste wood to recycle old asphalt. *Construction and Building Materials*, 189, 568-575.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.201>

กฤตย์ คมขำ. (2554). การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวโดยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

กัญจน์ สลิวังศ์. (2020). Improvement of Sub-Standard Lateritic Soil with Cement-Polymer Mixtures. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, 1427-1432.

สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ. (2555). คู่มือการปฏิบัติงาน ASPHALT HOT-MIX RECYCLING. In กรมทางหลวง (Ed.), กรมทางหลวง (pp. 6-8).

อำนาจ เทียนพัด. (2545). การปรับปรุงดินลูกรังเพื่อใช้เป็นพื้นทางโดยใช้เถ้าลอยและหินฝุ่น สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ].

- A. Maghchiche, A. H., B. Immirzi. (2018). Use of polymers and biopolymers for water retaining and soil stabilization in arid and semiarid regions. *Journal of Taibah University for Science*, 4(1), 9-16. [https://doi.org/10.1016/s1658-3655\(12\)60022-3](https://doi.org/10.1016/s1658-3655(12)60022-3)
- A.G, S., Heeralal, M., & T, T. (2021). Soil Shrinkage Characterization of Low Plasticity Soil Using Digital Image Analysis Process. *International Journal of Engineering*, 34, 2206-2212. <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.10a.02>
- Ahmed, L. (2019). *Sandy Soil Stabilization with Polymer - Copy*.
- Apinun Buritatan, T. T., Suksun Horpibulsuk, Artit Udomchai, Menglim Hoy, Nopparat Vichitcholchai, Arul Arulrajah. (2020). Mechanical Strength Improvement of Cement-Stabilized Soil Using Natural Rubber Latex for Pavement Base Applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(12), 04020372. [https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003471](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003471)
- Austroroad. (2008). *Testing Asphalt in Accordance with the Austroads Mix Design Procedures*. A. Incorporated.
- Benali, Y., & Ghomari, F. (2017). Latex influence on the mechanical behavior and durability of cementitious materials. *Taylor & Francis Group*.
- Bowman, A. J., & Haigh, S. K. (2019). Subsurface deformation mechanisms beneath a flexible pavement using image correlation. *Géotechnique*, 69(7), 627-637. <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.P.092>
- Chen, B., Zhang, Z., Lan, Q., Liu, Z., & Tan, Y. (2023). Experiment Study on Damage Properties and Acoustic Emission Characteristics of Layered Shale under Uniaxial Compression. *Materials*, 16(12), 4317. <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/12/4317>
- Dubois, V., Abriak, N. E., Zentar, R., & Ballivy, G. (2009). The use of marine sediments as a pavement base material. *Waste Manag*, 29(2), 774-782. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.05.004>
- Elliott, R., Dennis, N., & Qiu, Y. (1998). *Permanent deformation of subgrade soils (Phase I: A test protocol)*.

- Fauziah Ahmad, M. A. B. M. I., Yahya Atemimi. (2013). Evaluation the effects of styrene butadiene rubber addition as a new soil stabilizer on geotechnical properties. *Research Gate*.
- Głuchowski, A., & Sas, W. (2020). Long-Term Cyclic Loading Impact on the Creep Deformation Mechanism in Cohesive Materials. *Materials*, 13(17), 3907. <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/17/3907>
- Hatibu, N., & Hettiaratchi, D. R. P. (1993). The Transition From Ductile Flow to Brittle Failure in Unsaturated Soils. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 54(4), 319-328. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/jaer.1993.1024>
- Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A., Raksachon, Y., & Suddeepong, A. (2010). Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. *Construction and Building Materials*, 24(10), 2011-2021. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.011>
- International, A. (2015). Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures. In *D559/D559M – 15*.
- Ismail, M. S. B. A., Mehdi Pour Asghar, Fendereski, h., & Sadeghi, M. (2017). Measuring the effects of styrene butadiene copolymer latex-Portland cement additives on properties of stabilized soil-aggregate base. *ScienceDirect*.
- Iyengar, S. R., Masad, E., Rodriguez, A. K., Bazzi, H. S., Little, D., & Hanley, H. J. M. (2013). Pavement Subgrade Stabilization Using Polymers: Characterization and Performance. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(4), 472-483. [https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000612](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000612)
- Jeb Tingle, J. N., Steven Larson, Charles Weiss, John Rushing,. (2007). Stabilization Mechanisms of Nontraditional Additives. *Transportation Research Record*, 1989, 59-67. <https://doi.org/10.3141/1989-49>
- Jirayut Suebsuk, & Agakaradate Siriphan. (2017). Effects of Wetting and Drying Cycles on Strength of Cement Stabilized Lateritic Soil as Base Course Material. *Engineering Journal Chiang Mai University*.
- Jitsangiam, P. (2011). *Performance evaluation of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix design suitable for Thailand climatic and traffic conditions in the study area of North Thailand* (MRG5280105, Issue.



- Keawma, P., nusit, k., Khumkud, N., Chitsangiam, P., Pra-ai, S., Chidburee, P., & Chaiprakaikeow, S. (2022). The Temperature Effects on the Performance of Road Subbase Material Produced from Recycled Asphalt Pavement. *The 27th National Convention on Civil Engineering*, 27(0). <https://conference.thaince.org/index.php/ncce27/article/view/1403>
- Khumkud, N. (2023). *Laboratory assessment for long-term performance and durability of cement-polymer stabilized road base* Naresuan University]. Naresuan University.
- Kolay, P., & Dhakal, B. (2020). Geotechnical Properties and Microstructure of Liquid Polymer Amended Fine-Grained Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01163-x>
- Mairaing, W. (2003). Unsaturated soil strength for mountain slope stability analysis.
- N. M. Toohey, M. A. M., R. G. Bearce. (2013). Relationship between Resilient Modulus and Unconfined Compressive Strength for Lime-Stabilized Soils [Article]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 139(11), 1982-1985. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000925](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000925)
- Nusit, K. (2016). *Development of an Advanced Fatigue Model of a Cement-Treated Base Material Based on Continuum Damage Mechanics* Curtin University]. Curtin University.
- P. Indiramma, C. S., S. Needhidasan. (2019). Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment. *ScienceDirect*.
- Patel, S. K., & Singh, B. (2017). Strength and Deformation Behavior of Fiber-Reinforced Cohesive Soil Under Varying Moisture and Compaction States. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(4), 1767-1781. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0207-y>
- Powell, W. D., Transport, & Road Research, L. (1984). *The Structural design of bituminous roads*. Transport and Road Research Laboratory Crowthorne, Berkshire.
- Prabir K. Kolay, B. D., Sanjeev Kumar, Vijay K. Puri. (2016). Effect of Liquid Acrylic Polymer on Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils. *CrossMark*.

- Prabir Kolay, B. D. (2020). Geotechnical Properties and Microstructure of Liquid Polymer Amended Fine-Grained Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01163-x>
- Ratanaikom, W. (2015). *Study and development of engineering properties of marine dredged sediments from Laemchabang harbour as a new material resource for road construction* (Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation., Issue.
- Rezaeimalek, S., Nasouri, A., Huang, J., Bin-Shafique, S., & Gilazghi, S. T. (2017). Comparison of short-term and long-term performances for polymer-stabilized sand and clay. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 4(2), 145-155. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.01.003>
- Salour, F. (2015). *Moisture Influence on Structural Behaviour of Pavements* KTH, Royal Institute of Technology].
- Shao, Z., Jenkins, G., & Oh, E. (2017). Assessing the impacts of climate change on road infrastructure. *GEOMATE*, 13(38), 120-128.
- Site Onyejekwe, G. G. (2014). Soil stabilization using proprietary liquid chemical stabilizers: sulphonated oil and a polymer. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74, 651-665. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0667-8>
- Song, Z., Zhang, D., Mao, Y., Mu, Y., Zhang, K., & Zhang, Q. (2020). Behavior of Lime-Stabilized Red Bed Soil after Cyclic Wetting-Drying in Triaxial Tests and SEM Analysis [Article]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2020/4230519>
- Standard, A. (1996). Absorption, swell and capillary rise of compacted materials. In *AS 1141.53—1996*.
- Suksun Horpibulsuk, R. R., Avirut Chinkulkijniwat, Yuttana Raksachon, Apichat Suddeepong. (2010). Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. *Construction and Building Materials*, 24(10), 2011-2021. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.011>
- Supasit Pongsivasathita, S. H., Suthee Piyaphipat. (2019). Assessment of mechanical properties of cement stabilized soils. *ScienceDirect*.

- Tang, L., Wang, Y., Sun, Y., Chen, Y., & Zhao, Z. (2022). A Review on the Failure Modes of Rock and Soil Mass under Compression and the Exploration about Constitutive Equations of Rock and Soil Mass. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 7481767. <https://doi.org/10.1155/2022/7481767>
- The Siam Cement Company. (1965). *Demonstration Road Using Local Soil with Cement Stabilization*. Bangkok [Siam Cement].
- Toohey, N. M., Mooney, M. A., & Bearce, R. G. (2013). Relationship between Resilient Modulus and Unconfined Compressive Strength for Lime-Stabilized Soils [Article]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 139(11), 1982-1985. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000925](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000925)
- Transport, D. o. (1986). *Cementitious stabilizers in road construction*. Dept. of Transport Pretoria, South Africa.
- Wang, X. Y. (2016). Investigation of the reactivity and grain size of lime calcined at extra-high temperatures by flash heating. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116, 1159-1164. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n12a10>
- Wen, H., Muhunthan, B., Wang, J., Li, X., Edil, T., & Tinjum, J. (2014). *Characterization of Cementitiously Stabilized Layers for Use in Pavement Design and Analysis*. <https://doi.org/10.17226/22247>
- Yeo, Y. S. (2011). *Characterisation of cement-treated crushed rock basecourse for Western Australian roads* Curtin University]. Curtin University.
- Zhang, R., You, Z., Wang, H., Chen, X., Si, C., & Peng, C. (2018). Using bio-based rejuvenator derived from waste wood to recycle old asphalt. *Construction and Building Materials*, 189, 568-575. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.201>
- Zhu, Y., Yu, X., Gao, L., Chen, J., & Cotugno, M. D. (2019). Unconfined Compressive Strength of Aqueous Polymer-Modified Saline Soil. *International Journal of Polymer Science*, 2019, 9137069. <https://doi.org/10.1155/2019/9137069>
- เอกพิสิษฐ์ บรรจงเกลี้ยง, ปิติวัฒน์ วัฒนชัย, & รัฐภูมิ ประชาตปรีชา. (2016). The Study of the Rain Washing Resistance of External Rubber-Clay Plaster of adobe walls under

Accelerated Climate Condition Simulating. *Academic journal uttaradit rajabhat university*, 11.

กรมทางหลวง. (2515). ทดลองค่า Liquid Limits (L.L.). In *ทล-ท102/2515*.

กรมทางหลวง. (2516). วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง. In *ทล.ท 204/2516*.

กรมทางหลวง. (2516). วิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน. In *ทล.ท 105/2515*.

กรมทางหลวง. (2517). วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน. In *ทล.ท 108/2517*.

กรมทางหลวง. (2517). วิธีการหาขนาดคละของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง. In *ทล-ท 205/2517*.

กรมทางหลวง. (2532). มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase). In *ทล.ม 206/2532*.

กรมทางหลวง. (2556). มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base). In *ทล.ม 204/2556*.

กรมทางหลวง. (2556). มาตรฐานหินคลุกผสมซีเมนต์ (Cement Modified Crushed Rock Base). In *ทล.ม 203/2556*.

กฤตย์ คมขำ. (2554). *การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวโดยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*].

กัญจน์ สลึงค์. (2020). Improvement of Sub-Standard Lateritic Soil with Cement-Polymer Mixtures. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ*, 1427-1432.

ชาคริต อนันต์มั่งคั่ง. (2548). *การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยปูนซีเมนต์ เพื่อใช้สำหรับงานทางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*].

นราชัย ตันติววิทย์. (2546). *ลักษณะสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุแอสฟัลต์ธรรมดา กับที่ใช้วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมธรรมชาติเป็นสารผสมเพิ่ม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*].

นางสาวกาญจนา ปิ่นวิเศษ. (2560). *การพัฒนาถนนดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพารา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*].

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวิศักดิ์ ศรีจันทร์อินทร์. (2558). *การปรับปรุงคุณภาพของหินปลายตะแกรงสำหรับงานก่อสร้างถนน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ*].

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศาสน์ สุขประเสริฐ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุदनรินทร์ เพชรรัตน์, & นางสาวรุ่งอรุณ บุญถ่าน. (2560). *Applications of Natural rubber and Soil-Cement for Highway construction มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี*].

รณภูมิ ลิ้มศรีสวัสดิ์. (2553). *การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้เถ้าหนักและเศษปูนขาว*  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์].

สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ. (2555). คู่มือการปฏิบัติงาน ASPHALT HOT-MIX RECYCLING. In  
กรมทางหลวง (Ed.), *กรมทางหลวง* (pp. 6-8).

อานิสงส์ จิตนารินทร์. (2558). *การประเมินคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินปูนจากลักษณะทางศิลา*  
*วิทยา และองค์ประกอบเคมี*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

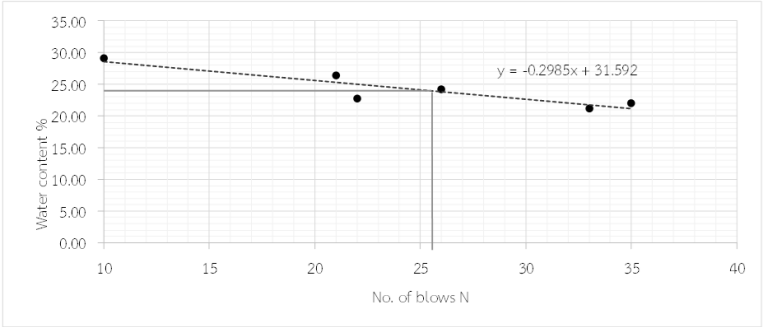
อำนาจ เทียนพัด. (2545). *การปรับปรุงดินลูกรังเพื่อใช้เป็นพื้นทางโดยใช้เถ้าลอยและหินฝุ่น* สถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ].







## ผลการทดสอบ Liquid Limit and Plastic limit ของวัสดุดินปลายตะแกรง

Liquid Limit And Plastic Limit						
Project : การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน				วัสดุ : Quarry by product		
ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง						
Date : 9/4/2562						
<b>Liquid Limit Determination</b>						
can no.	1	2	3	4	5	6
Mass of wet soil + can	23.304	22.125	25.014	24.653	24.779	26.695
Mass of dry soil + can	21.963	21.065	23.465	22.929	22.852	24.995
Mass of can	16.064	16.252	16.154	16.406	16.227	17.971
Mass of dry soil	5.899	4.813	7.311	6.523	6.625	7.024
Mass of moisture	1.341	1.06	1.549	1.724	1.927	1.7
Water content	22.73	22.02	21.19	26.43	29.09	24.20
No.of blows N	22	35	33	21	10	26
						
<b>Plastic Limit Determination , P.L.</b>						
can no.	1	2	3	สรุปผลการทดสอบ		
Mass of wet soil + can	22.412	20.092	18.219	LL	24	
Mass of dry soil + can	21.431	19.546	17.869	PL	19.89	
Mass of can	16.382	16.756	16.176	Plasticity index	4.11	
Mass of dry soil	5.049	2.79	1.693			
Mass of moisture	0.981	0.546	0.35			
Water content	19.43	19.57	20.67			
Water content (Average)	19.89					



ผลการทดสอบร้อยละการสึกกร่อนของ Coarse Aggregate ของวัสดุดินปลายตะแกรง

ABRASION TEST OF COARSE AGGREGATE																														
BY LOS ANGELES MACHINE																														
Project	การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง																													
Test By	Iradapron	Date	9/22/2563																											
Material	ดินปลายตะแกรง	Norminal Sive																												
source		Sampel No																												
Grading	B	Number of revolution	500																											
Number of abrasive	11	Weight of charges	4584 gm																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Sieve size</th> <th>Accumulative</th> </tr> <tr> <th>Passing</th> <th>Retained on</th> <th>Weight of Sample (gm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3/4"</td> <td>1/2"</td> <td>2500</td> </tr> <tr> <td>1/2"</td> <td>3/8"</td> <td>2500</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Original Mass of sample</td> <td>5000 gm</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Final mass of sample</td> <td>3438 gm</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Loss</td> <td>1562 gm</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Percentage of wear</td> <td>31.24 %</td> </tr> </tbody> </table>				Sieve size		Accumulative	Passing	Retained on	Weight of Sample (gm)	3/4"	1/2"	2500	1/2"	3/8"	2500				Original Mass of sample		5000 gm	Final mass of sample		3438 gm	Loss		1562 gm	Percentage of wear		31.24 %
Sieve size		Accumulative																												
Passing	Retained on	Weight of Sample (gm)																												
3/4"	1/2"	2500																												
1/2"	3/8"	2500																												
Original Mass of sample		5000 gm																												
Final mass of sample		3438 gm																												
Loss		1562 gm																												
Percentage of wear		31.24 %																												

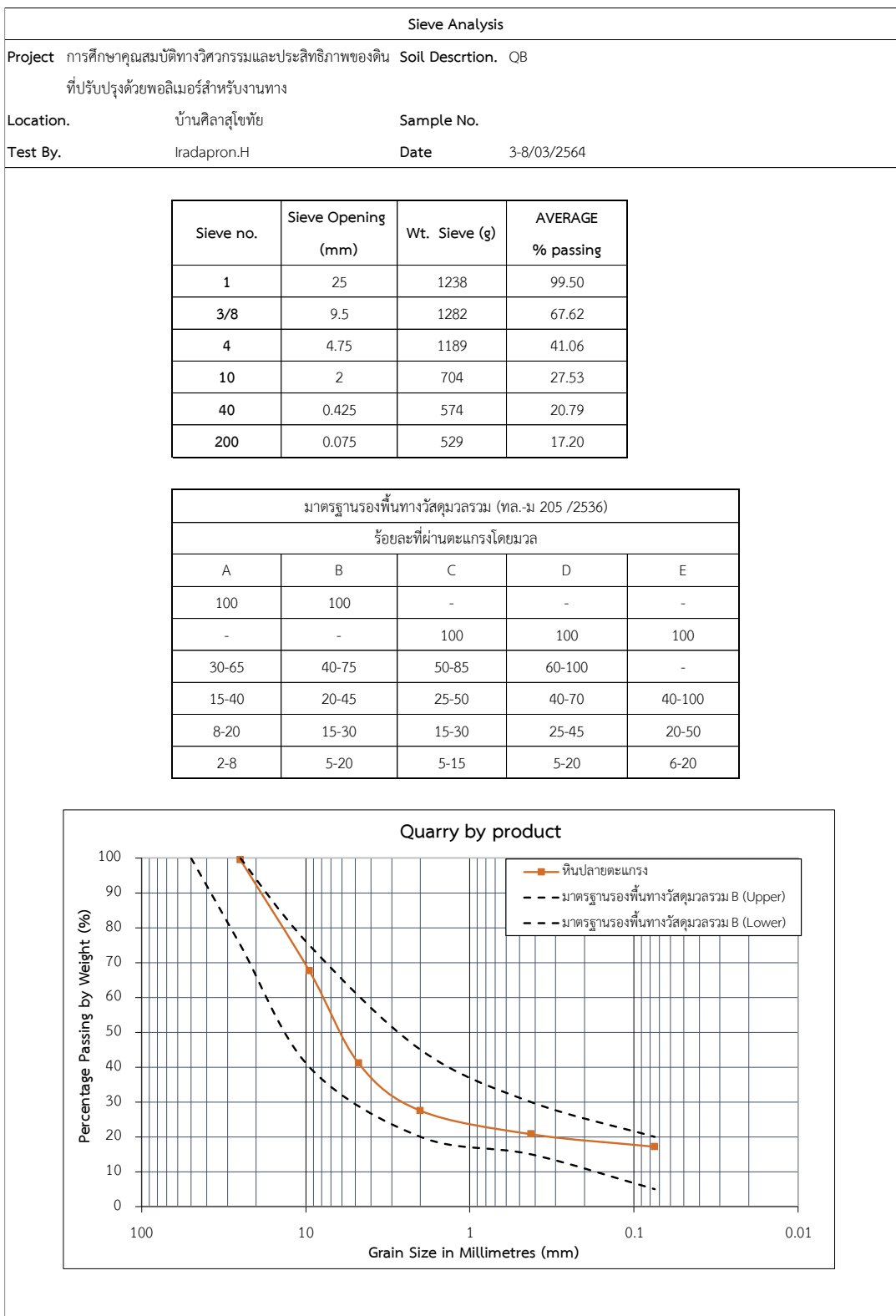
### ผลการทดสอบร้อยละผ่านตะแกรงวัสดุดินปลายตะแกรง

Sieve Analysis							
Project การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง				Soil Descrtion. QB			
Location. บ้านศิลาสุโขทัย		Sample No. 1					
Test By. Iradapron.H		Date 3-8/03/2564					
Dry Mass of Sample pre washing (g):				1907			
Dry Mass of Sample After Washing (g):				1659			
Loss of Mass through Washing (g):				248			
Total % Passing 0.075mm Sieve (No 200):				13.00			
Sieve no.	Sieve Opening (mm)	Wt. Sieve (g)	Wt. Sieve+Soil (g)	Wt. Soil Retained (g)	Cumulative Retained (g)	Cumulative Retained %	Precent Finer %
1	25	1238	1257	19	19	1.00	99.00
3/8	9.5	1282	1902	620	639	33.51	66.49
4	4.75	1189	1723	534	1173	61.51	38.49
10	2	704	975	271	1444	75.72	24.28
40	0.425	574	713	139	1583	83.01	16.99
200	0.075	529	603	74	1657	86.89	13.11
pan		485	487	250.00	1907	100.00	0.00
SUM				1907			

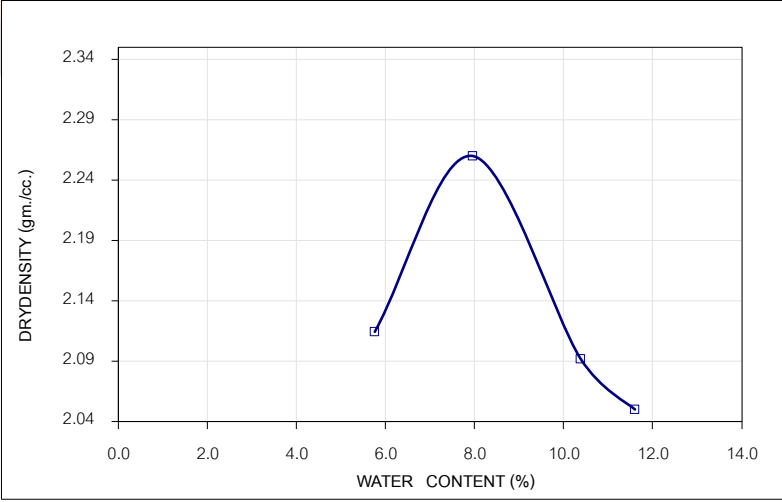
### ผลการทดสอบร้อยละผ่านตะแกรงวัสดุดินปลายตะแกรง

Sieve Analysis																					
Project การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง				Soil Descrion. QB																	
Location. บ้านศิลาสุโขทัย		Sample No. 2																			
Test By. Iradapron.H		Date 3-8/03/2564																			
Dry Mass of Sample pre washing (g):				1724																	
Dry Mass of Sample After Washing (g):				1503																	
Loss of Mass through Washing (g):				221																	
Total % Passing 0.075mm Sieve (No 200):				12.82																	
Sieve no.	Sieve Opening (mm)	Wt. Sieve (g)	Wt. Sieve+Soil (g)	Wt. Soil Retained (g)	Cumulative Retained (g)	Cumulative Retained %	Precent Finer %														
1	25	1238	1238	0	0	0.00	100.00														
3/8	9.5	1282	1878	596	596	31.25	68.75														
4	4.75	1189	1668	479	1075	56.37	43.63														
10	2	704	949	245	1320	69.22	30.78														
40	0.425	574	692	118	1438	75.41	24.59														
200	0.075	529	592	63	1501	78.71	21.29														
pan		485	487	223.00	1724	90.40	9.60														
SUM				1724																	
<table border="1"> <caption>Data points for the Sieve Analysis Graph</caption> <thead> <tr> <th>Grain Size (mm)</th> <th>Percentage Passing (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>100</td><td>100.00</td></tr> <tr><td>9.5</td><td>68.75</td></tr> <tr><td>4.75</td><td>43.63</td></tr> <tr><td>2</td><td>30.78</td></tr> <tr><td>0.425</td><td>24.59</td></tr> <tr><td>0.075</td><td>21.29</td></tr> </tbody> </table>								Grain Size (mm)	Percentage Passing (%)	100	100.00	9.5	68.75	4.75	43.63	2	30.78	0.425	24.59	0.075	21.29
Grain Size (mm)	Percentage Passing (%)																				
100	100.00																				
9.5	68.75																				
4.75	43.63																				
2	30.78																				
0.425	24.59																				
0.075	21.29																				

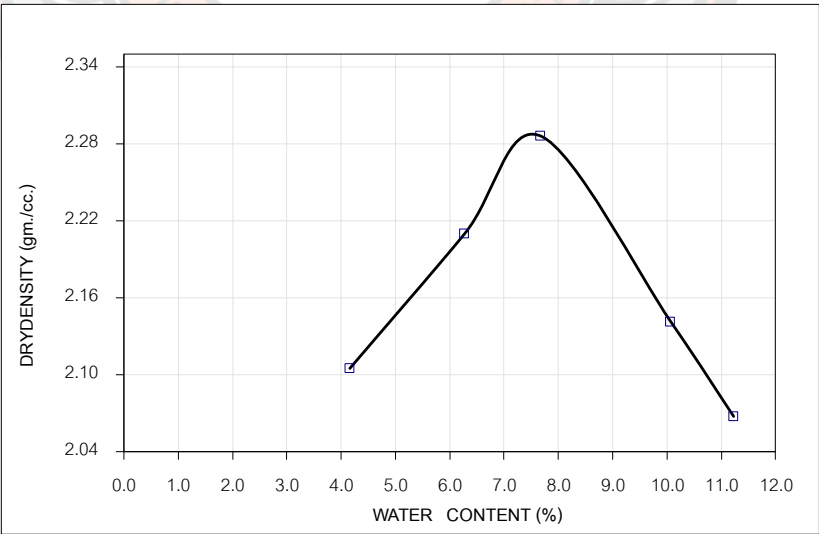
### ผลการทดสอบร้อยละผ่านตะแกรงวัสดุดินปลายตะแกรง



### ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุดินปลายตะแกรง

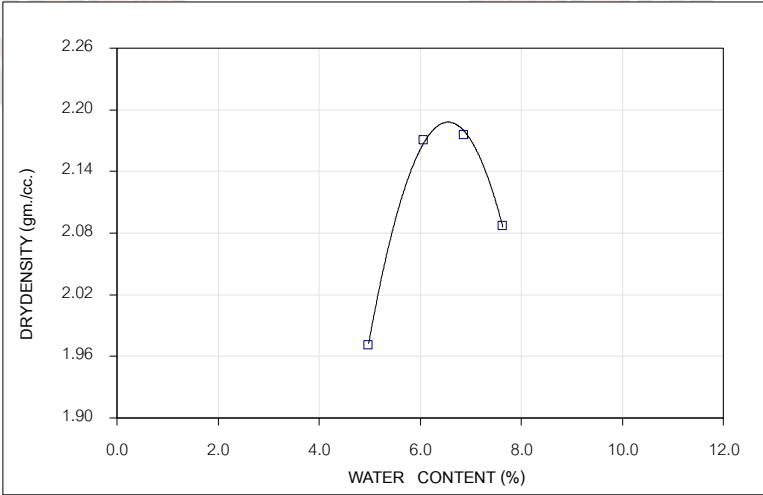
COMPACTION TEST							
Project การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง				Test By Iradapron			
Location				Soil Description QB			
				Date 13/6/2563			
Type fo compaction : Modified Proctor Test							
Mold DIA. (cm)	10.16	HT. (cm)	11.64	VOL.(cm <sup>3</sup> )	943.69201	WT.(gm)	4376
WT.Of Hammer.(lb)	10	No. Of Blows	25	HT.Of Drop	18	No. Of Layer	5
Density Determination:							
Tare No.		1	2	3	4		
WT.Of Mold+Wet Soil	(g)	6486	6678	6555	6535		
WT.Of Wet Soil	(g)	2110	2302	2179	2159		
Wet Density	(g/cm <sup>3</sup> )	2.24	2.44	2.31	2.29		
Dry Density	(g/cm <sup>3</sup> )	2.11	2.26	2.09	2.05		
Water Content:							
WT.Of Tare	(g)	16.21	16.37	16.61	15.77		
WT.Of Tare+Wet Soil	(g)	156.32	149.33	121.87	136.02		
WT.Of Tare+Dry Soil	(g)	148.69	139.53	111.97	123.52		
WT.Of Water	(g)	7.63	9.795	9.905	12.507		
WT.Of Dry Soil	(g)	132.475	123.168	95.359	107.75		
Water Content:	(%)	5.76	7.95	10.39	11.61		
							
Optimum moisture = 8 % Maximum dry unit weight = 2.26 g/cm <sup>3</sup>							

### ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุดินปลายตะแกรงผสมซีเมนต์

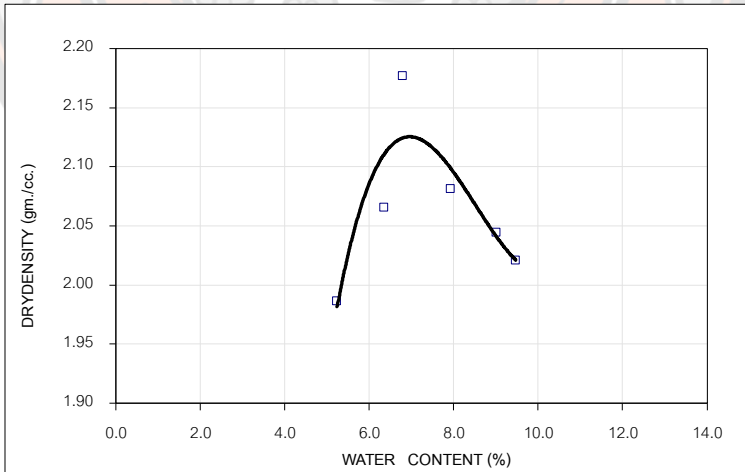
COMPACTION TEST							
Project		การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง			Test By		lradapron
Location					Soil Description		QB-C
					Date		13/6/2563
Type fo compaction : Modified Proctor							
Mold DIA. (cm)	10.16	HT. (cm)	11.64	VOL.(cm <sup>3</sup> )	943.692	WT.(gm)	4376
WT.Of Hammer.(lb)	10	No. Of Blows	25	HT.Of Drop	18	No. Of Layer	5
Density Determination:							
Tare No.		1	2	3	4	5	
WT.Of Mold+Wet Soil	(g)	6445	6592	6699	6600	6546	
WT.Of Wet Soil	(g)	2069	2216	2323	2224	2170	
Wet Density	(g/cm <sup>3</sup> )	2.19	2.35	2.46	2.36	2.30	
Dry Density	(g/cm <sup>3</sup> )	2.10	2.21	2.29	2.14	2.07	
Water Content:							
WT.Of Tare	(g)	16.213	16.365	16.607	15.765	16.497	
WT.Of Tare+Wet Soil	(g)	114.475	93.103	133.714	101.771	77.003	
WT.Of Tare+Dry Soil	(g)	110.554	88.579	125.371	93.905	70.899	
WT.Of Water	(g)	3.921	4.524	8.343	7.866	6.104	
WT.Of Dry Soil	(g)	94.341	72.214	108.764	78.14	54.402	
Water Content:	(%)	4.16	6.26	7.67	10.07	11.22	
							
Optimum moisture = 7.7 % Maximum dry unit weight = 2.29 g/cm <sup>3</sup>							

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุดินปลายตะแกรง

ผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA

COMPACTION TEST							
Project การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง				Test By Iradapron			
Location				Soil Description QB-CSA			
				Date 15/6/2563			
Type fo compaction : Standard Product							
Mold DIA. (cm)	10.16	HT. (cm)	11.64	VOL.(cm <sup>3</sup> )	943.692	WT.(gm)	4187
WT.Of Hammer.(lb)	10	No. Of Blows	25	HT.Of Drop	18	No. Of Layer	5
Density Determination:							
Tare No.		1	2	3	4		
WT.Of Mold+Wet Soil	(g)	6140	6360	6307	6381		
WT.Of Wet Soil	(g)	1953	2173	2120	2194		
Wet Density	(g/cm <sup>3</sup> )	2.07	2.30	2.25	2.32		
Dry Density	(g/cm <sup>3</sup> )	1.97	2.17	2.09	2.18		
Water Content:							
WT.Of Tare	(g)	23.43	25.85	23.683	22.467		
WT.Of Tare+Wet Soil	(g)	71.51	61.16	61.079	65.462		
WT.Of Tare+Dry Soil	(g)	69.23	59.14	58.427	62.702		
WT.Of Water	(g)	2.28	2.02	2.652	2.76		
WT.Of Dry Soil	(g)	45.8	33.29	34.744	40.235		
Water Content:	(%)	4.98	6.07	7.63	6.86		
							
Optimum moisture = 6.06 % Maximum dry unit weight = 2.17 g/cm <sup>3</sup>							

**ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุดินปลายตะแกรง  
ผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR**

COMPACTION TEST								
Project การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง				Test By Iradapron				
Location				Soil Description QB-CSBR				
				Date 15/6/2563				
Type fo compaction : Modified Proctor Test								
Mold DIA. (cm)	10.16	HT. (cm)	11.64	VOL.(cm <sup>3</sup> )	943.69201	WT.(gm)	4187	
WT.Of Hammer.(lb)	10	No. Of Blows	25	HT.Of Drop	18	No. Of Layer	5	
Density Determination:								
Tare No.		1	2	3	4	5	6	
WT.Of Mold+Wet Soil	(g)	6160	6260	6275	6307	6381	6290	
WT.Of Wet Soil	(g)	1973	2073	2088	2120	2194	2103	
Wet Density	(g/cm <sup>3</sup> )	2.09	2.20	2.21	2.25	2.32	2.23	
Dry Density	(g/cm <sup>3</sup> )	1.99	2.07	2.02	2.08	2.18	2.04	
Water Content:								
WT.Of Tare	(g)	23.21	22.79	22.90	22.99	23.25	22.89	
WT.Of Tare+Wet Soil	(g)	37.68	63.38	41.90	53.84	70.65	68.39	
WT.Of Tare+Dry Soil	(g)	36.96	60.96	40.26	51.57	67.64	64.63	
WT.Of Water	(g)	0.72	2.42	1.644	2.263	3.013	3.76	
WT.Of Dry Soil	(g)	13.75	38.17	17.357	28.583	44.383	41.74	
Water Content:	(%)	5.24	6.34	9.47	7.92	6.79	9.01	
 <p style="text-align: center;">Optimum moisture = 7.3 % Maximum dry unit weight = 2.14 g/cm<sup>3</sup></p>								





## ผลการทดสอบ Liquid Limit and Plastic limit ของวัสดุหินคลุก

Liquid Limit And Plastic Limit					
Project : การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง			Type : Crush rock		
Date : 20/4/2563					
Liquid Limit Determination ,L.L.					
can no.	1	2	3	4	5
Mass of wet soil + can	29.392	36.530	43.752	37.726	37.746
Mass of dry soil + can	26.963	34.225	40.069	33.488	33.464
Mass of can	16.858	24.634	25.167	17.143	17.913
Mass of dry soil	10.105	9.591	14.902	16.345	15.551
Mass of moisture	2.429	2.305	3.683	4.238	4.282
Water content	24.0	24.0	24.7	25.9	27.5
No.of blows N	30	28	26	19	16
Plastic Limit Determination , P.L.					
can no.	1	2	3	สรุปผลการทดสอบ	
Mass of wet soil + can	26.38	34.656	28.09	LL	24.96
Mass of dry soil + can	24.449	31.696	26.306	PL	22.01
Mass of can	15.407	18.173	18.472	Plasticity index	2.95
Mass of dry soil	9.042	13.523	7.834		
Mass of moisture	1.931	2.96	1.784		
Water content	21.36	21.89	22.77		
Water content (Average)	22.01				

ผลการทดสอบร้อยละการสึกกร่อนของ Coarse Aggregate ของวัสดุหินคลุก

ABRASION TEST OF COARSE AGGREGATE																														
BY LOS ANGELES MACHINE																														
<b>Project</b> การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง																														
<b>Test By</b> Iradapron	<b>Date</b> 9/22/2563																													
<b>Material</b> หินคลุก	<b>Norminal Sive</b>																													
<b>source</b> โรงโม่หินสุวรรณ สุโขทัย	<b>Sampel No</b>																													
<b>Grading</b> B	<b>Number of revolution</b>	500																												
<b>Number of abrasive</b> 11	<b>Weight of charges</b>	4584	gm																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Sieve size</th> <th>Accumulative</th> </tr> <tr> <th>Passing</th> <th>Retained on</th> <th>Weight of Sample (gm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3/4"</td> <td>1/2"</td> <td>2500</td> </tr> <tr> <td>1/2"</td> <td>3/8"</td> <td>2500</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Original Mass of sample</td> <td>5000 gm</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Final mass of sample</td> <td>3454 gm</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Loss</td> <td>1546 gm</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Percentage of wear</td> <td>30.92 %</td> </tr> </tbody> </table>				Sieve size		Accumulative	Passing	Retained on	Weight of Sample (gm)	3/4"	1/2"	2500	1/2"	3/8"	2500				Original Mass of sample		5000 gm	Final mass of sample		3454 gm	Loss		1546 gm	Percentage of wear		30.92 %
Sieve size		Accumulative																												
Passing	Retained on	Weight of Sample (gm)																												
3/4"	1/2"	2500																												
1/2"	3/8"	2500																												
Original Mass of sample		5000 gm																												
Final mass of sample		3454 gm																												
Loss		1546 gm																												
Percentage of wear		30.92 %																												

### ผลการทดสอบค่าความคงทน (Soundness) ของวัสดุหินคลุก

#### Soundness test of aggregate

Sample หินคลุก

Source โรงโม่บ้านศิลา จ.สุโขทัย

1. Quantitative Examination Coarse Aggregate

Sieve Size mm	% Retained of original sample	Mass of test Fraction Before Test gm	Mass of test Fraction After Test gm	Actual Loss gm	Actual % Loss	Weighted % Loss
9.5-4.75	23.08	300	280	20	6.67	1.54
12.5-9.5	25.38	331	330	1	0.30	0.08
19.0-12.5	51.54	670.00	668.00	2	0.30	0.15
<b>Total % Loss</b>						<b>1.77</b>

< 9 (พ.ล. - พ. 213/2515)

2. Solution Sodium Sulfate

3. Number of Cycles 5 Cycles



### ผลการทดสอบร้อยละผ่านตะแกรงวัสดุหินคลุก

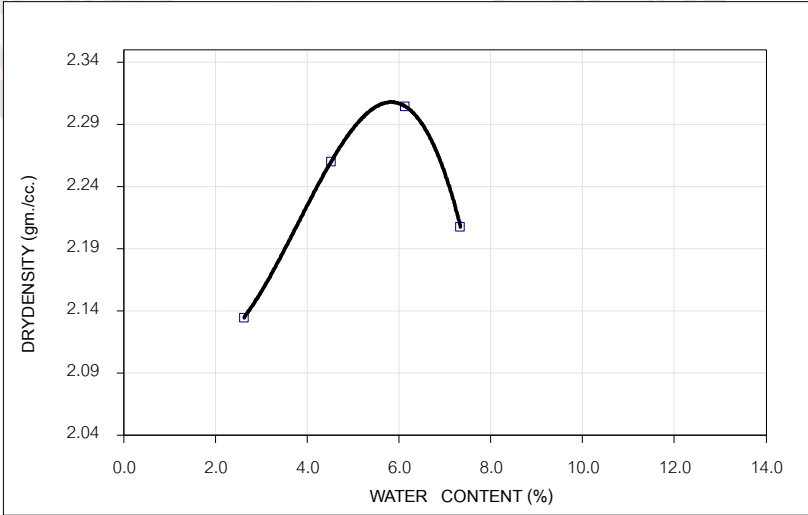
Sieve Analysis							
Project	การศึกษาคูณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดินที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง	Soil Descrtion.	หินคลุก				
Location.	บ้านศิลาสุโขทัย	Sample No.	1				
Test By.	Iradapron.H	Date	20/06/2564				
Total Mass of Air Dried Sample (g):				1002			
Dry Mass of Sample pre washing (g):				1002			
Dry Mass of Sample After Washing (g):				875			
Loss of Mass through Washing (g):				127			
Total % Passing 0.075mm Sieve (No 200):				12.67			
Sieve no.	Sieve Opening (mm)	Wt. Sieve (g)	Wt. Sieve+Soil (g)	Wt. Soil Retained (g)	Cumulative Retained (g)	Cumulative Retained %	Precent Finer %
2	50	557	557	0	0	0	100
1	25	532	532	0	0	0.00	100.00
3/8"	9.5	777	998.5	221.5	221.5	22.11	77.89
4	4.75	704	1021	317	538.5	53.74	46.26
10	2	574	773	199	737.5	73.60	26.40
40	0.425	522	616.5	94.5	832	83.03	16.97
200	0.075	529	570	41	873	87.13	12.87
Pan		485	487	129	1002	100.00	0.00

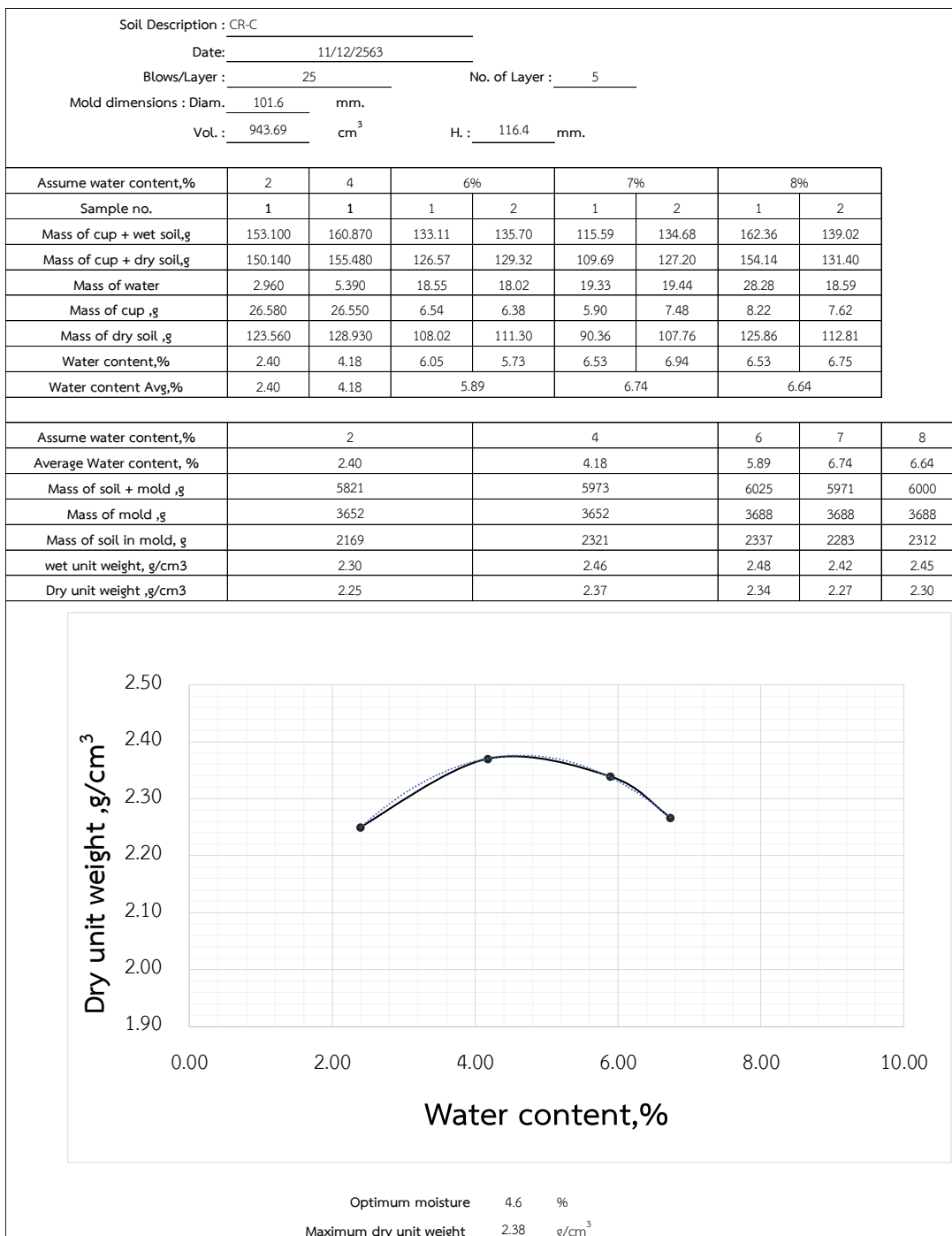
#### Crush rock

Grain Size (mm)	Percentage Passing (%)
100	100
25	100
10	77.89
4.75	46.26
2	26.40
0.425	16.97
0.075	12.87

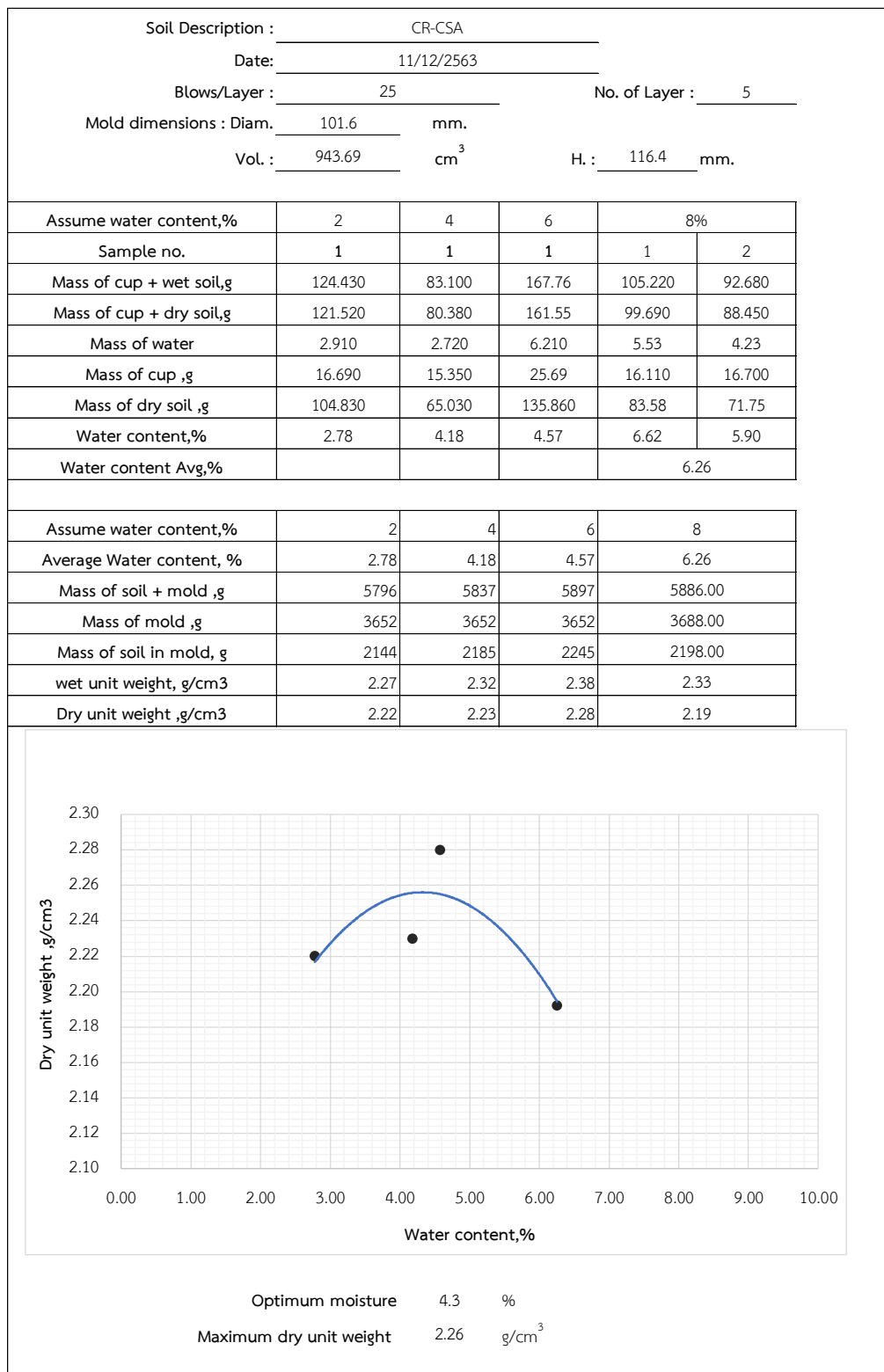
### ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุหินคลุก

COMPACTION TEST							
Project การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง				Test By Iradapron			
Location				Soil Description CR			
				Date 15/6/2563			
Type fo compaction : Modified Proctor Test							
Mold DIA. (cm)	10.16	HT. (cm)	11.64	VOL.(cm <sup>3</sup> )	943.69201	WT.(gm)	3688
WT.Of Hammer.(lb)	10	No. Of Blows	25	HT.Of Drop	18	No. Of Layer	5
Density Determination:							
Tare No.		1	2	3	4		
WT.Of Mold+Wet Soil	(g)	5755	5917	5996	5924		
WT.Of Wet Soil	(g)	2067	2229	2308	2236		
Wet Density	(g/cm <sup>3</sup> )	2.19	2.36	2.45	2.37		
Dry Density	(g/cm <sup>3</sup> )	2.13	2.26	2.30	2.21		
Water Content:							
WT.Of Tare	(g)	15.94	17.21	16.86	17.6		
WT.Of Tare+Wet Soil	(g)	128.32	202.49	159.91	161.83		
WT.Of Tare+Dry Soil	(g)	125.46	194.49	151.64	151.97		
WT.Of Water	(g)	2.86	8	8.27	9.86		
WT.Of Dry Soil	(g)	109.52	177.28	134.78	134.37		
Water Content:	(%)	2.61	4.51	6.14	7.34		
 <p style="text-align: center;">Optimum moisture = 5.8 % Maximum dry unit weight = 2.31 g/cm<sup>3</sup></p>							

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุหินคลุกผสมซีเมนต์

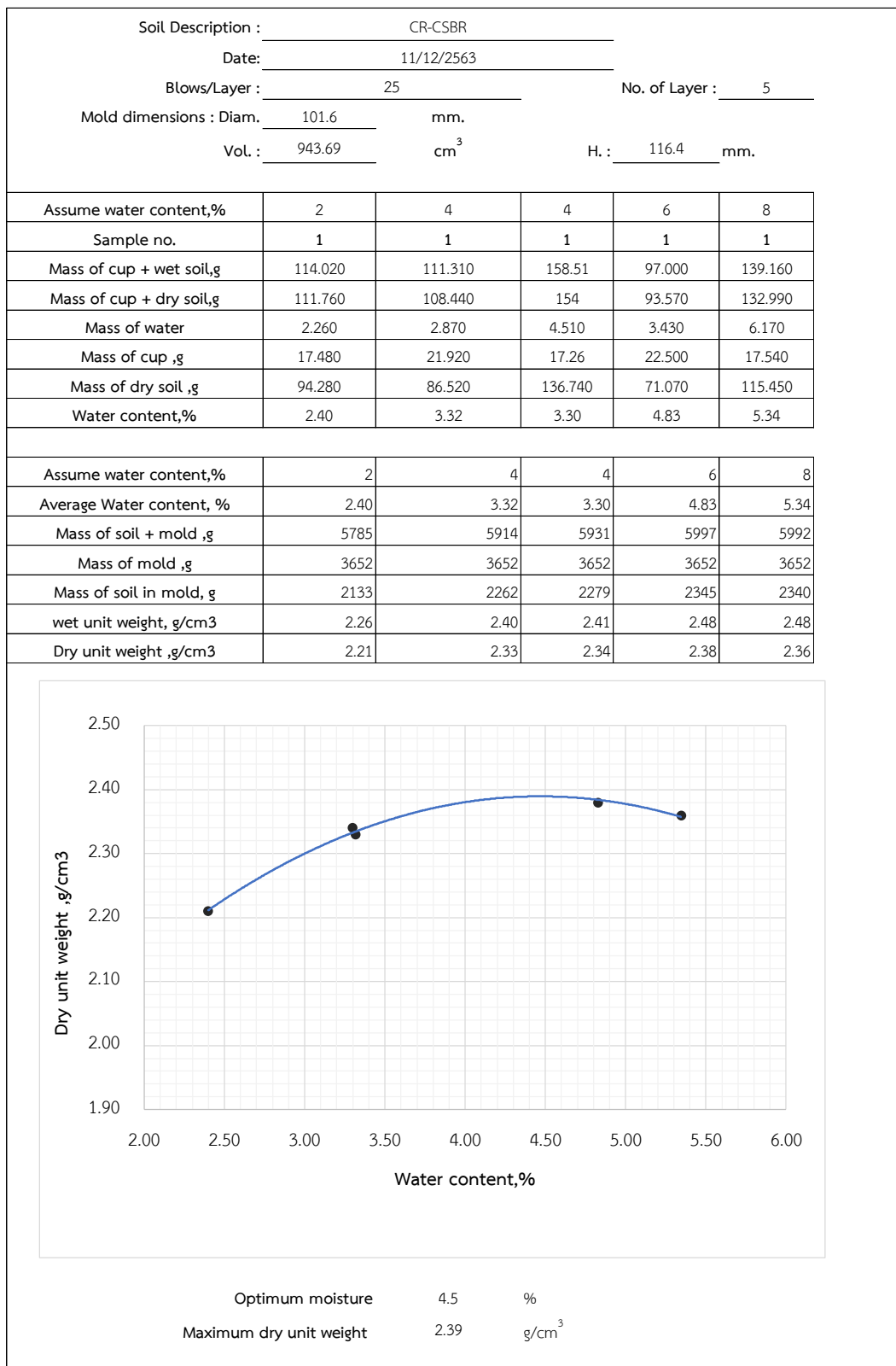


ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุหินคลุกผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA





ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุหินคลุกผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR





วัสดุมวลรวมประเภท  
วัสดุผิวทางเก่า

## ผลการทดสอบ Liquid Limit and Plastic limit ของวัสดุผิวทางเก่า

Project : การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง		Type : Reclaimed Asphalt Pavement
Date : 20/4/2563		
<b>Liquid Limit Determination</b> ผลการทดสอบ : N/A		
<b>Plastic Limit Determination</b> ผลการทดสอบ : N/A		
<b>Plasticity index</b> ผลการทดสอบ : NP (Non-plastic)		

ผลการทดสอบร้อยละการสึกกร่อนของ Coarse Aggregate ของวัสดุผิวทางเก่า

ABRASION TEST OF COARSE AGGREGATE																																	
BY LOS ANGELES MACHINE																																	
<b>Project</b>	การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง																																
<b>Test By</b>	Iradapron	<b>Date</b>	9/22/2563																														
<b>Material</b>	วัสดุผิวทางเก่า	<b>Norminal Sive</b>																															
<b>source</b>		<b>Sampel No</b>																															
<b>Grading</b>	B	<b>Number of revolution</b>	500																														
<b>Number of abrasive</b>	11	<b>Weight of charges</b>	4584 gm																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Sieve size</th> <th>Accumulative</th> </tr> <tr> <th>Passing</th> <th>Retained on</th> <th>Weight of Sample (gm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3/4"</td> <td>1/2"</td> <td>2500</td> </tr> <tr> <td>1/2"</td> <td>3/8"</td> <td>2500</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Original Mass of sample</td> <td>5010 gm</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Final mass of sample</td> <td>3818 gm</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Loss</td> <td>1192 gm</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Percentage of wear</td> <td>23.79 %</td> </tr> </tbody> </table>				Sieve size		Accumulative	Passing	Retained on	Weight of Sample (gm)	3/4"	1/2"	2500	1/2"	3/8"	2500							Original Mass of sample		5010 gm	Final mass of sample		3818 gm	Loss		1192 gm	Percentage of wear		23.79 %
Sieve size		Accumulative																															
Passing	Retained on	Weight of Sample (gm)																															
3/4"	1/2"	2500																															
1/2"	3/8"	2500																															
Original Mass of sample		5010 gm																															
Final mass of sample		3818 gm																															
Loss		1192 gm																															
Percentage of wear		23.79 %																															

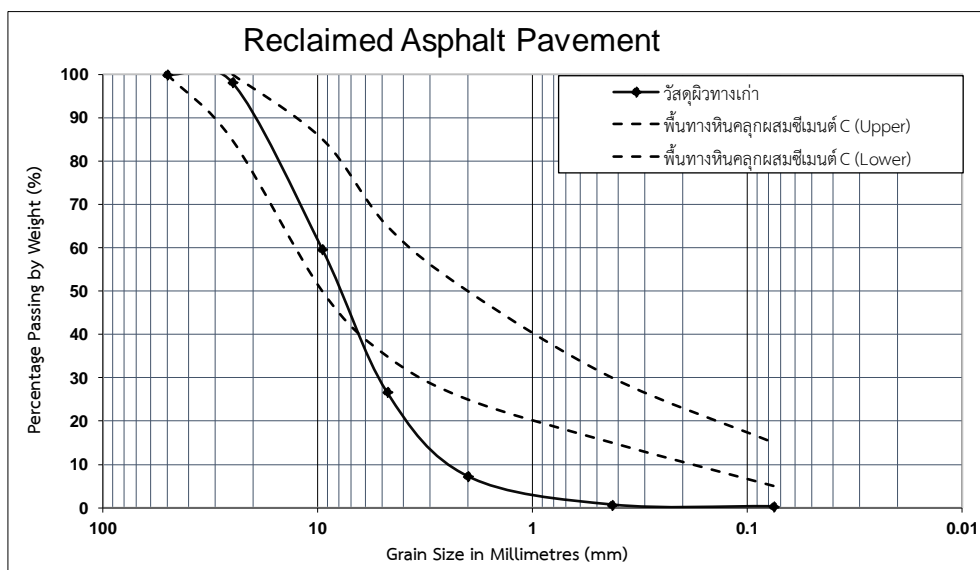
### ผลการทดสอบค่าความคงทน (Soundness) ของวัสดุผิวทางเก่า

Soundness test of aggregate						
Sample	RAP (Aggregate) Lime Stone					
Source	-					
1. Quantitative Examination			Coarse Aggregate			
Sieve Size mm	% Retained of original sample	Mass of test Fraction Before Test gm	Mass of test Fraction After Test gm	Actual Loss gm	Actual % Loss	Weighted % Loss
19.0 - 12.5	67.00	700	670	30	4.29	2.87
12.5 - 9.5	33.00	330	300	30	9.09	3.00
<b>Total % Loss</b>					<b>5.87</b>	
<b>&lt; 9 (ทล. - ท. 213/2515)</b>						
2. Solution	Sodium Sulfate					
3. Number of Cycles	5 Cycles					



### ผลการทดสอบร้อยละผ่านตะแกรงวัสดุผิวทางเก่า

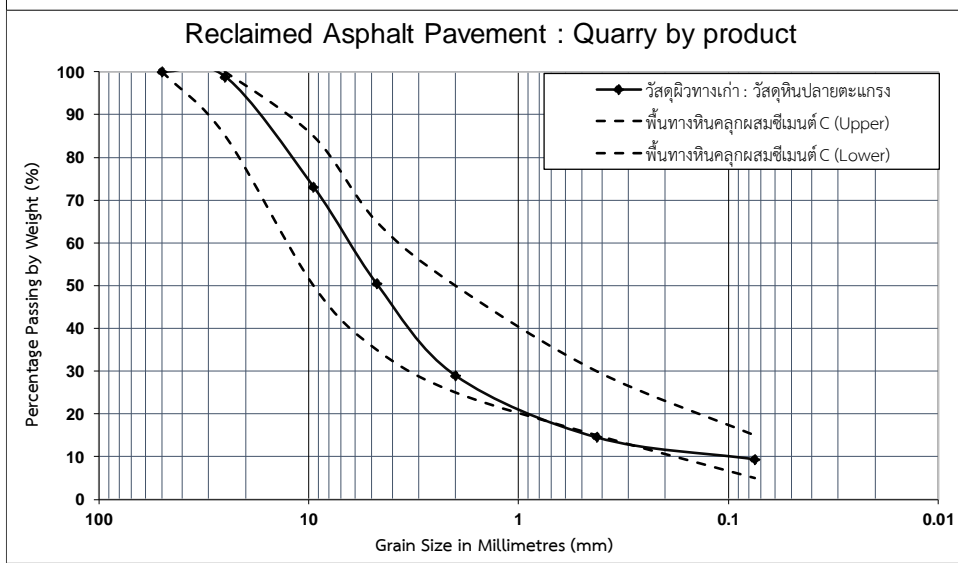
Sieve Analysis							
Project	การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดินที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง	Soil Descrtion.	วัสดุผิวทางเก่า				
Location.	บ้านศิลาสุโขทัย	Sample No.	1				
Test By.	Iradaorn.H	Date	22/10/2564				
Sieve no.	Sieve Opening (mm)	Wt. Sieve (g)	Wt. Sieve+Soil (g)	Wt. Soil Retained (g)	Cumulative Retained (g)	Cumulative Retained %	Precent Finer %
2	50	1226	1226	0	0	0	100
1	25	1238	1291	53	53	1.77	98.23
3/8"	9.5	1282	2438	1156	1209	40.30	59.70
4	4.75	1190	2179	989	2198	73.27	26.73
10	2	704	1287	583	2781	92.70	7.30
40	0.425	574	771	197	2978	99.27	0.73
200	0.075	529	541	12	2990	99.67	0.33
Pan		485	495	10	3000	100.00	0.00



**ผลการทดสอบร้อยละผ่านตะแกรงวัสดุผิวทางเก่าผสมดินปลายตะแกรง**

Sieve Analysis			
Project	การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดินที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง	Soil Descrption.	วัสดุผิวทางเก่า : ดินปลายตะแกรง (2:1)
Location.	บ้านศิลาสุโขทัย	Sample No.	1
Test By.	lradaporn.H	Date	22/11/2564

Sieve no.	Sieve Opening (mm)	Wt. Sieve (g)	Wt. Sieve+Soil (g)	Wt. Soil Retained (g)	Cumulative Retained (g)	Cumulative Retained %	Precent Finer %
2	50	1226	1226	0	0	0	100
1	25	1238	1291	53	53	1.18	98.82
3/8"	9.5	1282	2438	1156	1209	26.87	73.13
4	4.75	1190	2209	1019	2228	49.51	50.49
10	2	704	1671	967	3195	71.00	29.00
40	0.425	574	1224	650	3845	85.44	14.56
200	0.075	529	760	231	4076	90.58	9.42
Pan		485	909	424	4500	100.00	0.00



### ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุผิวทางเก่า

Project		การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง				Test By		Iradapron			
Location						Soil Description		RAP			
						Date		3/11/2563			
WATER CONTENT DETERMINATION :						MOLD VOLUME 944 cm <sup>3</sup>					
% Water by mass		2%		4%		6%		8%		5%	
TRIAL NO.		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
WET SOIL + CAN,	(g)	139.63	157.34	147.65	98.11	145.55	140.14	146.61	136.67	139.49	153.32
DRY SOIL + CAN,	(g)	137.19	154.62	142.52	95.12	138.70	133.95	138.01	129.31	133.34	146.92
WT. OF CAN,	(g)	16.73	19.20	17.05	16.01	16.65	17.18	17.96	18.28	17.10	18.30
WT. OF WATER,	(g)	2.44	2.72	5.13	2.99	6.85	6.19	8.60	7.36	6.15	6.40
WT. OF DRY SOIL,	(g)	120.46	135.42	125.47	79.11	122.05	116.77	120.05	111.03	116.24	128.62
WATER CONTENT	(%)	2.03	2.01	4.09	3.78	5.61	5.30	7.16	6.63	5.29	4.98
WATER CONTENT Avg	(%)	2.02		3.93		5.46		6.90		5.13	
WT. OF SOIL + MOLD,	(g)	5,578	5,578	5,674	5,674	5,851	5,851	5,777	5,777	5,723	5,723
WT. OF MOLD,	(g)	3,680	3,680	3,679	3,679	3,680	3,680	3,680	3,680	3,679	3,679
WT. OF SOIL IN MOLD,	(g)	1,898	1,898	1,995	1,995	2,171	2,171	2,097	2,097	2,044	2,044
WET DENSITY,	(g/cm <sup>3</sup> )	2.01	2.01	2.11	2.11	2.30	2.30	2.22	2.22	2.17	2.17
DRY DENSITY,	(g/cm <sup>3</sup> )	1.97	1.97	2.03	2.04	2.18	2.18	2.07	2.08	2.06	2.06
DRY DENSITY Avg	(%)	1.97		2.03		2.18		2.08		2.06	

Optimum moisture 6 %

Maximum dry unit weight 2.12 g/cm<sup>3</sup>



### ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุผิวทางเก่าผสมซีเมนต์

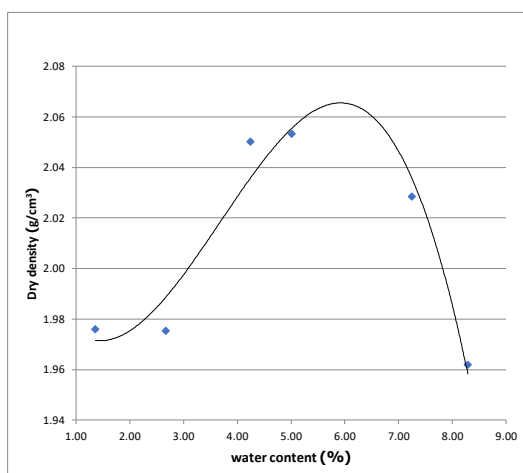
Project		การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดินที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง				Test By		Iradapron			
		Soil Description RAP-C									
WATER CONTENT DETERMINATION :		MOLD VOLUME		944		cm <sup>3</sup>					
% Water by mass		4%		6%		8%		10%			
TRIAL NO.		1	2	1	2	1	2	1	2		
WET SOIL + CAN,	(g)	146.66	136.10	148.57	157.55	162.81	180.19	161.840	154.870		
DRY SOIL + CAN,	(g)	141.65	131.43	142.27	151.46	153.48	170.13	159.110	152.500		
WT. OF CAN,	(g)	19.09	25.59	25.97	25.38	17.18	26.24	20.040	25.320		
WT. OF WATER,	(g)	5.01	4.67	6.30	6.09	9.33	10.06	2.730	2.370		
WT. OF DRY SOIL,	(g)	122.56	105.84	116.30	126.08	136.30	143.89	139.070	127.180		
WATER CONTENT	(%)	4.09	4.41	5.42	4.83	6.85	6.99	1.963	1.864		
WATER CONTENT Avg	(%)	4.25		5.12		6.92		1.91			
DENSITY DETERMINATION :											
WT. OF SOIL + MOLD,	(g)	5,768	5,768	5,837	5,837	5,847	5,847	5,643	5,643		
WT. OF MOLD,	(g)	3,680	3,680	3,679	3,679	3,679	3,679	3,680	3,680		
WT. OF SOIL IN MOLD,	(g)	2,088	2,088	2,158	2,158	2,168	2,168	1,963	1,963		
WET DENSITY,	(g/cm <sup>3</sup> )	2.21	2.21	2.29	2.29	2.30	2.30	2.079	2.079		
DRY DENSITY,	(g/cm <sup>3</sup> )	2.12	2.12	2.17	2.18	2.15	2.15	2.039	2.041		
DRY DENSITY Avg	(%)	2.12		2.17		2.15		2.04			

	Optimum moisture	5.8	%
	Maximum dry unit weight	2.20	g/cm <sup>3</sup>

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุผิวทางเก่าผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA

Project การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดินที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง				Test By iradapron									
WATER CONTENT DETERMINATION :				MOLD VOLUME 944 cm <sup>3</sup>									
% Water by mass		10%		4%		6%		8%		10%		12%	
TRIAL NO.		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
WET SOIL + CAN,	(g)	166.44	153.10	154.42	156.15	112.60	113.67	101.39	100.00	126.15	113.81	158.26	155.45
DRY SOIL + CAN,	(g)	156.67	144.42	151.10	152.72	108.70	110.14	97.51	95.95	124.73	112.46	147.81	144.5
WT. OF CAN,	(g)	20.94	25.34	24.88	26.05	22.16	21.68	18.05	17.25	17.28	15.42	16.79	17.19
WT. OF WATER,	(g)	9.77	8.68	3.32	3.43	3.90	3.53	3.88	4.05	1.42	1.35	10.45	10.95
WT. OF DRY SOIL,	(g)	135.73	119.08	126.22	126.67	86.54	88.46	79.46	78.70	107.45	97.04	131.02	127.31
WATER CONTENT	(%)	7.20	7.29	2.63	2.71	4.51	3.99	4.88	5.15	1.32	1.39	7.98	8.60
WATER CONTENT Avg	(%)	7.24		2.67		4.25		5.01		1.36		8.29	
WT. OF SOIL + MOLD,	(g)	5,732	5,732	5,593	5,593	5,696	5,696	5,714	5,714	5,569	5,569	5,684	5,684
WT. OF MOLD,	(g)	3,679	3,679	3,679	3,679	3,679	3,679	3,679	3,679	3,679	3,679	3,679	3,679
WT. OF SOIL IN MOLD,	(g)	2,053	2,053	1,914	1,914	2,017	2,017	2,035	2,035	1,890	1,890	2,005	2,005
WET DENSITY,	(g/cm <sup>3</sup> )	2.18	2.18	2.03	2.03	2.14	2.14	2.16	2.16	2.00	2.00	2.124638	2.124638
DRY DENSITY,	(g/cm <sup>3</sup> )	2.03	2.03	1.98	1.97	2.05	2.06	2.06	2.05	1.98	1.98	1.967697	1.95637
DRY DENSITY Avg	(%)	2.03		1.98		2.05		2.05		1.98		1.96	



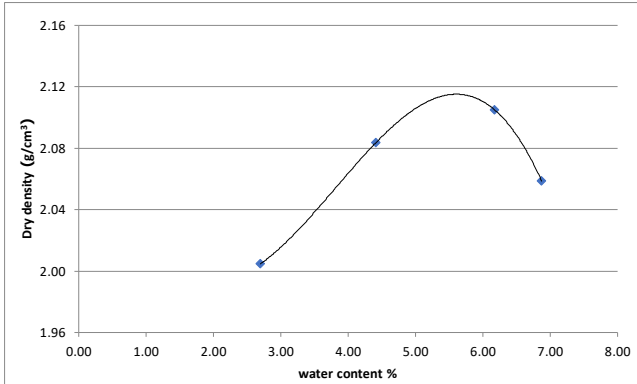
Optimum moisture 5.8 %  
 Maximum dry unit weight 2.07 g/cm<sup>3</sup>



ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุผิวทางเก่าผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR

Project การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดินที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง			Test By Iradapron							
Soil Description RAP-CSBR			MOLD VOLUME 944 cm <sup>3</sup>							
WATER CONTENT DETERMINATION :			4%		6%		8%		10%	
% Water by mass										
TRIAL NO.			1	2	1	2	1	2	1	2
WET SOIL + CAN,	(g)		150.18	163.05	150.64	152.56	104.58	96.46	83.57	89.72
DRY SOIL + CAN,	(g)		146.92	158.93	144.89	147.32	99.45	91.75	78.94	85.18
WT. OF CAN,	(g)		16.95	16.52	16.96	26.37	15.45	16.38	15.06	15.39
WT. OF WATER,	(g)		3.26	4.12	5.75	5.24	5.13	4.71	4.63	4.54
WT. OF DRY SOIL,	(g)		129.97	142.41	127.93	120.95	84.00	75.37	63.88	69.79
WATER CONTENT	(%)		2.51	2.89	4.49	4.33	6.11	6.25	7.25	6.51
WATER CONTENT Avg	(%)		2.70		4.41		6.18		6.88	
WT. OF SOIL + MOLD,	(g)		5622	5622	5,732	5,732	5,788	5,788	5,755	5,755
WT. OF MOLD,	(g)		3,679	3,679	3,679	3,679	3,679	3,679	3,679	3,679
WT. OF SOIL IN MOLD,	(g)		1,943	1,943	2,053	2,053	2,109	2,109	2,076	2,076
WET DENSITY,	(g/cm <sup>3</sup> )		2.06	2.06	2.18	2.18	2.23	2.23	2.20	2.20
DRY DENSITY,	(g/cm <sup>3</sup> )		2.01	2.00	2.08	2.09	2.11	2.10	2.05	2.07
DRY DENSITY Avg	(%)		2.00		2.08		2.10		2.06	



Optimum moisture 5.6 %

Maximum dry unit weight 2.12 g/cm<sup>3</sup>



ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบด้านกำลังรับแรง

มหาวิทยาลัยพระนคร



**ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างประเภทไม่แช่น้ำ**

<b>Project</b> การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง							
(Unconfined Compression Test, UCS)							
Sample No.		1		2		3	
Unsoak		$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	UCS (Kpa)	$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	UCS (Kpa)	$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	UCS (Kpa)
<b>Quarry by product</b>							
1	QB	81.00	2.17	111.00	2.15	100.66	2.16
2	QB-C	620.00	2.17	622.00	2.18	580.71	2.17
3	QB-CSA	957.00	2.23	1,499.00	2.27	1,250.00	2.25
4	QB-CSBR	1,092.00	2.22	982.00	2.24	999.54	2.23
<b>Crush rock</b>							
1	CR	197.94	2.35	208.94	2.33	210.55	2.35
2	CR-C	2,434.57	2.33	2,200.93	2.37	2,355.14	2.33
3	CR-CSA	1,147.69	2.24	1,020.29	2.25	1,102.77	2.25
4	CR-CSBR	2,211.77	2.31	1,412.12	2.30	1,987.44	2.30
<b>Reclaimed Asphalt Pavement : RAP</b>							
1	RAP	169.54	2.16	180.56	2.16	172.66	2.16
2	RAP-C	1,228.12	2.12	1,261.33	2.13	1,250.63	2.12
3	RAP-CSA	729.00	2.02	801.64	2.05	907.56	2.04
4	RAP-CSBR	953.75	2.08	1,156.25	2.08	1,056.55	2.08

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างประเภทแช่้ำ

<b>Project</b> การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง							
<b>(Unconfined Compression Test, UCS)</b>							
Sample No.		1		2		3	
Soak		$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	UCS (Kpa)	$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	UCS (Kpa)	$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	UCS (Kpa)
<b>Quarry by product</b>							
1	QB						
2	QB-C	432.00	2.21	602.00	2.22	450.56	2.20
3	QB-CSA	981.00	2.25	1,026.00	2.25	1,010.70	2.23
4	QB-CSBR	919.00	2.23	836.00	2.23	988.78	2.23
<b>Crush rock</b>							
1	CR						
2	CR-C	1,727.37	2.36	2,228.61	2.34	2,023.50	2.17
3	CR-CSA	732.42	2.22	550.21	2.23	809.63	2.24
4	CR-CSBR	1,329.14	2.30	1,027.77	2.31	1,211.88	2.18
<b>Reclaimed Asphalt Pavement : RAP</b>							
1	RAP						
2	RAP-C	1,002.57	2.17	1,059.57	2.09	1,026.59	2.17
3	RAP-CSA	611.29	2.01	819.58	2.05	729.30	2.09
4	RAP-CSBR	833.00	2.05	607.00	2.03	750.69	2.06





**ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของตัวอย่าง ประเภทไม่แช่น้ำ**

Project การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง							
(Indirect tensile strength : IDT)							
Sample No.	1		2		3		
Unsoak	$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	UCS (Kpa)	$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	UCS (Kpa)	$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	UCS (Kpa)	
Quarry by product							
1	QB	20	2.03	23	2.11	22	2.03
2	QB-C	213	2.14	131	2.13	226	2.17
3	QB-CSA	252	2.06	216	2.08	202	2.03
4	QB-CSBR	201	2.04	249	2.02	275	2.02
Crush rock							
1	CR	22	2.25	19	2.22	28	2.19
2	CR-C	123	2.35	146	2.31	189	2.24
3	CR-CSA	86	2.24	88	2.25	106	2.15
4	CR-CSBR	218	2.35	169	2.29	130	2.26
Reclaimed Asphalt Pavement : RAP <input type="checkbox"/>							
1	RAP	32	2.03	34	2.03	35	2.03
2	RAP-C	296	2.19	300	2.2	333	2.17
3	RAP-CSA	249	2.05	210	2.05	230	2.07
4	RAP-CSBR	334	2.11	333	2.12	319	2.08

**ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของตัวอย่าง ประเภทแช่น้ำ**

<b>Project</b> การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง							
(Indirect tensile strength : IDT)							
Sample No.		1		2		3	
Soak		$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	UCS (Kpa)	$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	UCS (Kpa)	$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	UCS (Kpa)
<b>Quarry by product</b>							
1	QB						
2	QB-C	116	2.17	110	2.17	165	2.18
3	QB-CSA	78	2.07	50	2.07	53	2.07
4	QB-CSBR	116	2.05	144	2.01	150	2.07
<b>Crush rock</b>							
1	CR						
2	CR-C	119	2.19	122	2.18	120	2.17
3	CR-CSA	84	2.12	74	2.15	66	2.24
4	CR-CSBR	123	2.18	155	2.34	152	2.18
<b>Reclaimed Asphalt Pavement : RAP</b> <input type="checkbox"/>							
1	RAP						
2	RAP-C	224	2.14	256	2.15	266	2.16
3	RAP-CSA	242	2.09	258	2.06	250	2.06
4	RAP-CSBR	278	2.11	259	2.09	287	2.11



ผลการทดสอบต้านทานการเปลี่ยนรูปร่าง  
(Dynamic Creep Test)

มหาวิทยาลัยพระนคร



ผลการทดสอบด้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุหินปลายตะแกรงผสมซีเมนต์  
ประเภทไม่แช่น้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	QB-C (Unsoak)	28:05:2021	
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	100		
0.101779 = % strain during conditioning			
Seconds	StresskPa	Strain%	TC-1
2	29.8	0.231	24.8
4	36.7	0.329	24.4
6	43.9	0.411	24.4
8	49.3	0.461	24.2
10	55.8	0.510	25.1
20	86.2	0.766	25.1
40	99.5	0.916	25.2
60	99.9	0.939	25.2
80	99.8	0.950	24.9
100	99.8	0.957	24.2
200	99.7	0.976	24.6
300	99.8	0.988	24.7
400	99.8	0.993	24.1
500	99.8	1.000	24.5
600	99.8	1.006	24.2
700	100.4	1.010	24.5
800	100	1.012	24.8
900	100.2	1.015	24.4
1000	99.8	1.019	24.2
1100	99.9	1.020	24.3
1200	99.9	1.021	25.1
1300	100	1.024	24.5
1400	100.1	1.024	24.3
1500	100.6	1.027	25
1600	99.8	1.028	24.6
1700	100	1.031	24.6
1800	99.8	1.028	25
1900	99.9	1.031	24.4
2000	100	1.034	24.3

การทดสอบด้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุหินปลายตะแกรงผสมซีเมนต์  
ประเภทแช่น้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	QB-C (Soak)	28:05:2021	
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	100		
0.005191 : % strain during conditioning			
Seconds	StresskPa	Strain%	TC-1
2	218.8	1.940	24.6
4	215.6	1.975	24.5
6	211.2	1.991	24.7
8	205.9	1.998	24.8
10	200.6	2.000	24.2
20	174.3	2.001	25
40	113.2	1.992	24.9
60	100.5	1.989	24.2
80	100.3	1.987	24.3
100	100.4	1.988	24.2
200	100.1	1.988	24.6
300	100	1.989	24.7
400	99.8	1.990	24.9
500	99.7	1.990	25.1
600	99.7	1.989	25.1
700	99.9	1.992	25.2
800	99.4	1.992	25.1
900	100	1.991	24.3
1000	99.5	1.991	24.5
1100	99.8	1.991	25
1200	99.8	1.991	25.1
1300	99.7	1.992	25.1
1400	99.8	1.991	24.4
1500	100.2	1.991	25.3
1600	99.9	1.991	24.2
1700	99.6	1.992	24.4
1800	99.5	1.992	25.1
1900	99.8	1.993	24.6
2000	100	1.993	25.1

การทดสอบต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุดินปลายตะแกรงผสมซีเมนต์  
พอลิเมอร์ชนิด SA ประเภทแช่น้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	QB-CSA (Unsoak)	28:05:2021	
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	250		
0.07938	= % strain during conditioning		
Seconds	StresskPa	Strain%	TC-1
2	108.5	0.285	24.4
4	117.8	0.285	24.5
6	124.4	0.559	24.7
8	130.3	0.660	24.7
10	139	0.714	24.8
20	169.5	0.829	24.4
40	229.9	0.882	24.4
60	248.5	0.921	25
80	249.7	0.948	24.3
100	249.8	0.968	24.6
200	249.6	0.984	24.5
300	249.8	0.998	25.1
400	249.8	1.009	24.4
500	250.3	1.018	25
600	250.1	1.028	24.7
700	250.1	1.037	25
800	250.1	1.048	25.3
900	250	1.052	24.5
1000	250.1	1.059	24.8
1100	250	1.064	24.4
1200	250	1.071	24.8
1300	249.9	1.075	25.3
1400	249.8	1.080	24.9
1500	249.9	1.085	25
1600	249.9	1.098	24.5
1700	249.7	1.105	25.3
1800	249.8	1.112	25.3
1900	249.9	1.120	24.4
2000	249.8	1.127	24.8

การทดสอบต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุดินปลายตะแกรงผสมซีเมนต์  
พอลิเมอร์ชนิด SA ประเภทแช่น้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	QB-CSA (Soak)	28:05:2021	
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	200		
0.143288	% strain during conditioning		
Seconds	StresskPa	Strain%	TC-1
2	82.3	0.514	24.5
4	90.9	0.581	24.7
6	97.4	0.622	24.6
8	103.6	0.654	25.3
10	109.7	0.685	25
20	139.4	0.815	24.7
40	196.8	1.019	24.4
60	200	1.077	25.1
80	199.7	1.096	25
100	199.8	1.112	24.7
200	199.8	1.140	24.3
300	199.8	1.155	24.7
400	199.8	1.164	25.4
500	199.9	1.169	25
600	199.8	1.176	24.9
700	200.2	1.181	25.4
800	200.1	1.184	24.9
900	200.2	1.188	25
1000	200.1	1.188	24.2
1100	200	1.193	25.3
1200	200	1.195	24.1
1300	199.9	1.197	24.4
1400	199.9	1.197	24.3
1500	200	1.196	25.2
1600	200	1.203	25.1
1700	199.7	1.202	24.8
1800	200.1	1.203	24.5
1900	200	1.206	25
2000	200.1	1.203	25



การทดสอบต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุดินปลายตะแกรงผสมซีเมนต์  
พอลิเมอร์ชนิด SBR ประเภทไม่แช่น้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	QB-CSBR (Unsoak)	28:05:2021	
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	210		
0.253468 = % strain during conditioning			
Seconds	StresskPa	Strain%	TC-1
2	217	0.788	24.3
4	214	0.829	24.6
6	214.4	0.852	24.4
8	214.4	0.868	24.4
10	214.6	0.879	24.7
20	213.8	0.911	25.2
40	211.3	0.953	24.7
60	210.3	0.978	24.7
80	210.3	0.998	24.3
100	210.5	1.014	24.9
200	209.8	1.082	25.1
300	209.8	1.131	24.6
400	210	1.184	24.5
500	209.8	1.231	24.8
600	209.9	1.267	25.1
700	209.8	1.302	24.7
800	209.9	1.327	24.4
900	210	1.346	25.1
1000	210.1	1.361	24.7
1100	210	1.372	25
1200	209.8	1.382	24.8
1300	209.9	1.393	24.6
1400	209.9	1.398	25.2
1500	209.7	1.402	24.5
1600	209.8	1.408	25.1
1700	209.7	1.411	25.2
1800	210	1.418	25
1900	209.7	1.421	25.3
2000	209.8	1.424	24.8

การทดสอบต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุดินปลายตะแกรงผสมซีเมนต์  
พอลิเมอร์ชนิด SBR ประเภทไม่แช่น้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	QB-CSBR (Soak)	28:05:2021	
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	180		
0.111918 : % strain during conditioning			
Seconds	StresskPa	Strain%	TC-1
2	178.3	1.310	24.4
4	181.4	1.365	24.3
6	182.5	1.399	24.4
8	182.7	1.425	24.6
10	182.6	1.444	24.9
20	181.8	1.491	24.2
40	180.2	1.537	24.3
60	180.2	1.561	24.2
80	180.3	1.577	24.6
100	180.1	1.587	25.1
200	179.8	1.625	24.8
300	179.8	1.643	24.6
400	180	1.659	24.7
500	179.7	1.668	24.7
600	179.8	1.678	24.9
700	179.8	1.686	24.1
800	179.7	1.690	24.4
900	180	1.693	23.9
1000	179.9	1.697	24.7
1100	179.8	1.702	24.5
1200	179.9	1.706	24.3
1300	179.7	1.709	24.6
1400	179.7	1.713	24.3
1500	179.8	1.715	24.8
1600	179.7	1.717	24.4
1700	179.8	1.720	24.3
1800	179.7	1.722	24.7
1900	179.7	1.724	25
2000	179.9	1.728	25



ผลการทดสอบด้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุหินคลุก ประเภทไม่แช่น้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	CR (Unsoak)	Unsoak	27:05:2021
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	40		
0.031269	% strain during conditioning		
Seconds	StresskPa	Strain%	TC-1
2	33	0.151	24.3
4	38.2	0.279	24.2
6	39.2	0.343	24.2
8	39.7	0.380	24.4
10	40	0.408	24.8
20	40.5	0.482	24.7
40	40.4	0.542	24.2
60	40.3	0.574	24.6
80	40.3	0.595	24.5
100	40.4	0.609	25
200	39.7	0.652	24.9
300	39.7	0.672	24.6
400	39.7	0.689	24.9
500	39.8	0.697	24.8
600	39.7	0.709	25.1
700	39.9	0.716	24.4
800	40.2	0.724	24.4
900	40.2	0.730	25.1
1000	40.1	0.736	25
1100	40.3	0.739	24.8
1200	40.2	0.744	24.6
1300	40.3	0.747	24.9
1400	40.2	0.750	24.6
1500	40.2	0.754	25.1
1600	40.2	0.757	24.7
1700	40.2	0.757	25.1
1800	40.2	0.763	25
1900	40.3	0.764	25.1
2000	40.2	0.765	24.4

ผลการทดสอบต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุหินคลุก ประเภทแช่น้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	CR-C (Unsoak)	Unsoak	31:05:2021
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	460		
0.055943 : % strain during conditioning			
Seconds	StresskPa	Strain%	TC-1
2	233.2	0.684	24.5
4	240.8	0.713	24.9
6	247.8	0.729	24.9
8	254.5	0.738	25
10	260.8	0.743	24.6
20	291.9	0.759	24.6
40	353.9	0.771	24.4
60	416.9	0.777	24.4
80	456.5	0.782	24.8
100	459.6	0.784	24.3
200	460.3	0.795	24.3
300	460	0.800	24.4
400	459.9	0.811	24.5
500	459.8	0.819	24.7
600	459.8	0.825	24.7
700	459.8	0.828	24.4
800	459.8	0.831	24
900	459.8	0.837	24.7
1000	459.8	0.838	24.1
1100	459.7	0.843	24.2
1200	459.7	0.845	24.4
1300	460.1	0.846	24.4
1400	459.6	0.848	24.4
1500	459.8	0.850	24.2
1600	459.7	0.852	24.3
1700	459.7	0.855	24
1800	459.8	0.856	23.8
1900	459.9	0.857	24.1
2000	459.8	0.860	23.9

ผลการทดสอบต้านทานการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของวัสดุหินคลุกผสมซีเมนต์ ประเภทแช่น้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	CR-C (soak)	31:05:2021	
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	210		
0.004456 = % strain during conditioning			
Seconds	StresskPa	Strain%	TC-1
2	215.8	0.745	24.9
4	214.8	0.774	24.9
6	215.5	0.790	24.9
8	213	0.798	24
10	212.7	0.804	24.4
20	211.7	0.819	24.8
40	210.3	0.832	24.8
60	210.3	0.838	24.4
80	210.3	0.843	24.3
100	210.4	0.845	24.5
200	210.1	0.856	24.9
300	209.9	0.861	24.6
400	209.9	0.862	24.1
500	209.9	0.865	24.8
600	210	0.866	24
700	209.9	0.866	24
800	209.9	0.870	24.7
900	209.8	0.871	24.4
1000	210.1	0.872	24.9
1100	209.9	0.874	24
1200	209.8	0.875	25
1300	209.7	0.875	24.6
1400	209.9	0.874	24.1
1500	209.9	0.876	24.8
1600	209.7	0.876	24.1
1700	209.7	0.877	24.1
1800	209.9	0.879	24.9
1900	209.8	0.879	24.9
2000	210.1	0.879	25

ผลการทดสอบด้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุหินคลุกผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA  
ประเภทไม้แช่น้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	CR-CSA (Unsoak)	31:05:2021	
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	220		
0.12119	= % strain during conditioning		
Seconds	StressKpa	Strain%	TC-1
2	210.3	0.48341	23.8
4	217.6	0.51737	23.8
6	220	0.537609	24.4
8	221.4	0.550289	23.5
10	222.1	0.562573	23.7
20	222.4	0.592632	24.1
40	220.2	0.619034	24.4
60	220.1	0.63367	24
80	220.1	0.643231	24.5
100	220.1	0.651915	23.8
200	220	0.677175	24.3
300	220	0.689723	24.2
400	220.1	0.69697	23.6
500	220	0.703313	23.8
600	220	0.710057	24.2
700	220.1	0.713646	23.7
800	220.1	0.716532	24.1
900	220	0.721691	24.3
1000	220.1	0.722748	24.2
1100	220	0.724561	24.3
1200	220.1	0.724941	23.9
1300	219.8	0.727362	23.7
1400	219.9	0.729366	24.4
1500	219.8	0.731173	24.1
1600	219.7	0.734154	24.1
1700	220.4	0.735053	23.6
1800	220	0.736612	24.6
1900	219.7	0.737516	23.7
2000	219.9	0.737119	23.8

ผลการทดสอบด้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุหินคลุกผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA  
ประเภทแช่น้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	CR-CSA (Soak)	31:05:2021	
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	140		
0.005544 = % strain during conditioning			
Seconds	StresskPa	Strain%	TC-1
2	130.3	0.983	24.1
4	137.6	1.017	24.4
6	140	1.038	24
8	141.4	1.050	24.5
10	142.1	1.063	23.8
20	142.4	1.093	24.3
40	140.2	1.119	24.2
60	140.1	1.134	23.6
80	140.1	1.143	23.8
100	140.1	1.152	24.2
200	140	1.177	23.7
300	140	1.190	24.1
400	140.1	1.197	24.3
500	140	1.203	24.2
600	140	1.210	24.3
700	140.1	1.214	23.9
800	140.1	1.217	23.7
900	140	1.222	24.4
1000	140.1	1.223	24.4
1100	140	1.225	24.6
1200	140.1	1.225	24
1300	139.8	1.227	24.9
1400	139.9	1.229	23.9
1500	139.8	1.231	24.5
1600	139.7	1.234	24.9
1700	140.4	1.235	25
1800	140	1.237	24.3
1900	139.7	1.238	24.1
2000	139.9	1.237	24.6



ผลการทดสอบต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุหินคลุกผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR  
ประเภทไม่แช่น้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	CR-CSBR (Unsoak)	31:05:2021	
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	360		
0.102445	= % strain during conditioning		
Seconds	StresskPa	Strain%	TC-1
2	365.2	0.380	24.6
4	364.4	0.419	24.5
6	363.2	0.437	24.4
8	361.6	0.447	24.2
10	360.6	0.454	24.4
20	359.3	0.482	24.4
40	360.1	0.509	24.6
60	362.9	0.523	24
80	361.7	0.533	24.9
100	366.5	0.542	23.9
200	362.1	0.565	24.5
300	362	0.578	24.9
400	361.9	0.590	25
500	361.8	0.597	24.3
600	361.7	0.602	24.1
700	361.7	0.607	25.1
800	361.6	0.611	24
900	361.5	0.613	24
1000	361.4	0.619	24.6
1100	361.3	0.621	24.9
1200	361.2	0.623	24.8
1300	361.1	0.625	24.8
1400	361.1	0.627	24.8
1500	361	0.629	24.4
1600	360.9	0.632	24
1700	360.8	0.632	24.8
1800	360.7	0.634	24.1
1900	360.6	0.636	24.6
2000	360.5	0.636	24.3

ผลการทดสอบด้านทานการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของวัสดุหินคลุกผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR  
ประเภทแช่น้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	CR-CSBR (soak)	31:05:2021	
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	140		
0.033856	= % strain during conditioning		
Seconds	StresskPa	Strain%	TC-1
2	155	0.880	24.5
4	153.9	0.919	24.9
6	150.8	0.937	24.9
8	146.7	0.947	25
10	144.3	0.954	24.6
20	144.4	0.982	24.6
40	141.5	1.009	24.4
60	140.2	1.023	24.4
80	140.2	1.033	24.8
100	140.4	1.042	24.3
200	139.9	1.065	24.3
300	139.8	1.078	24.4
400	139.6	1.090	24.5
500	139.9	1.097	24.7
600	139.7	1.102	24.7
700	140.1	1.107	24.4
800	139.7	1.111	24
900	139.8	1.113	25
1000	139.8	1.119	24.3
1100	139.6	1.121	24.1
1200	139.7	1.123	25.1
1300	139.8	1.125	24
1400	139.8	1.127	24
1500	139.9	1.129	24.6
1600	139.7	1.132	24.9
1700	139.6	1.132	24.8
1800	139.9	1.134	24.8
1900	139.9	1.136	24.8
2000	140	1.137	24.4



ผลการทดสอบด้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุผิวทางเก่า ประเภทไม่แช่น้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	RAP	<u>Unsoak</u>	31:05:2021
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	30		
0.310074	= % strain during conditioning		
Seconds	StresskPa	Strain%	TC-1
2	28.1	0.130	24.3
4	30.3	0.225	25
6	30.7	0.283	25.1
8	30.6	0.326	25.1
10	30.6	0.357	24.1
20	30.5	0.465	24.3
40	30.4	0.587	24.2
60	30.3	0.664	24.5
80	30.3	0.723	25.1
100	30.3	0.771	24.9
200	30.3	0.926	24.7
300	30.3	1.017	24.4
400	30.2	1.084	25
500	30.3	1.133	24.5
600	30.4	1.177	24.8
700	30.1	1.212	25
800	30.2	1.244	24.1
900	30.2	1.270	25.2
1000	30.3	1.293	24.3
1100	30.3	1.317	24.4
1200	30.2	1.337	25
1300	30.2	1.358	25.2
1400	30.3	1.374	24.4
1500	30.2	1.389	25.1
1600	30.2	1.404	25.2
1700	30.4	1.418	24.4
1800	30.3	1.433	24.4
1900	30.2	1.446	24.6
2000	30.2	1.459	24.8

ผลการทดสอบต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุผิวทางเก่าผสมซีเมนต์ ประเภทไม่แช่น้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	RAP-C (Unsoak)	Unsoak	31:05:2021
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	250		
0.02654	% strain during conditioning		
Seconds	StresskPa	Strain%	TC-1
2	168	1.342	24.4
4	176	1.401	24.8
6	183.5	1.435	24.9
8	190.2	1.461	24.9
10	196	1.481	24.1
20	227.4	1.547	24.3
40	248.1	1.616	24.6
60	249.8	1.658	25
80	250.1	1.689	24.3
100	250.3	1.712	24.3
200	250.2	1.785	24.4
300	250	1.826	24.1
400	250.3	1.854	24.9
500	250.3	1.876	24.1
600	249.9	1.894	24.2
700	249.8	1.909	24.9
800	249.7	1.920	24.8
900	249.6	1.931	25.2
1000	249.9	1.941	24.5
1100	249.6	1.948	25
1200	249.7	1.955	24.9
1300	249.7	1.960	25
1400	249.8	1.962	25
1500	249.8	1.963	25.1
1600	249.6	1.966	24.4
1700	250.3	1.966	24.9
1800	249.8	1.968	24
1900	250	1.971	24.1
2000	249.8	1.971	24.3

ผลการทดสอบด้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุผิวทางเก่าผสมซีเมนต์ ประเภทแช่น้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	RAP-C (Soak)	<u>soak</u>	31:05:2021
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	200		
0.802403	train during conditioning		
Seconds	StresskPa	Strain%	TC-1
2	205.4	1.107	24.4
4	203.6	1.181	24.4
6	203.8	1.230	24.4
8	203.8	1.268	24.7
10	203.7	1.302	23.9
20	202.2	1.438	24.4
40	200.2	1.604	24.5
60	200.1	1.677	24.9
80	200	1.722	24.3
100	200.1	1.755	25.3
200	199.8	1.845	24.2
300	199.8	1.892	25.2
400	199.6	1.924	24.7
500	199.8	1.947	24.3
600	199.6	1.964	24.4
700	199.7	1.980	24.3
800	199.5	1.990	24.4
900	199.7	2.001	25.1
1000	199.6	2.010	24
1100	199.2	2.017	25.2
1200	193.9	2.024	25.1
1300	189.3	2.031	25.1
1400	184.4	2.035	25.2
1500	180	2.041	24.5
1600	176.1	2.046	24.8
1700	172.7	2.049	24.1
1800	169.8	2.053	25.2
1900	167.4	2.056	24.1
2000	164.9	2.059	24.7

ผลการทดสอบด้านทานการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุผิวทางเก่าผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด  
SAประเภทไม่แช่น้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	RAP-CSA (Unsoak)	Unsoak	31:05:2021
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	160		
	*		
0.81158	= % strain during conditioning		
Seconds	StresskPa	Strain%	TC-1
2	224	0.842699	23.9
4	221.1	0.903874	24.5
6	217.5	0.942114	24.7
8	212.7	0.968912	24.5
10	207.2	0.990905	23.6
20	179.1	1.057387	24.4
40	159.8	1.130845	24.6
60	159.7	1.174303	24.6
80	159.6	1.204193	24.5
100	159.7	1.227317	23.8
200	159.8	1.297853	23.7
300	160.3	1.334223	24.3
400	160.2	1.35388	24.6
500	159.8	1.370726	23.8
600	159.8	1.382232	24.3
700	159.7	1.387698	24.6
800	160	1.392074	23.9
900	159.8	1.396477	24.5
1000	160.3	1.397349	24.7
1100	159.8	1.398311	24.2
1200	159.6	1.399553	25
1300	159.6	1.401392	24.2
1400	159.6	1.402302	25.1
1500	159.6	1.403718	24.4
1600	159.9	1.404484	25
1700	159.6	1.40385	24.9
1800	159.6	1.403972	24.2
1900	159.6	1.404225	24.5
2000	159.9	1.404659	25.1

ผลการทดสอบต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุผิวทางเก่าผสมซีเมนต์พอลิเมอร์  
ชนิด SA ประเภทแห้งน้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	RAP -CSA (Soak)	soak	31:05:2021
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	140		
	*		
0.351829	= % strain during conditioning		
Seconds	StresskPa	Strain%	TC-1
2	120.9	1.133399	24.8
4	120.7	1.208292	24.9
6	120.4	1.247861	25
8	120.2	1.272772	24.9
10	122.0	1.290537	24.4
20	123.9	1.327152	24.9
40	124.4	1.348618	24.6
60	124.5	1.368603	24.1
80	124.4	1.384556	25.1
100	123.7	1.399842	24.9
200	123.4	1.448554	25
300	122.5	1.48133	24.8
400	121.5	1.504429	24.2
500	120.7	1.522532	24.7
600	121.7	1.536687	24.5
700	121.4	1.547808	24.7
800	121.2	1.558543	24.9
900	139.7	1.568797	24.9
1000	139.4	1.576963	25.3
1100	139.2	1.587345	24.4
1200	138.9	1.591462	24.2
1300	138.9	1.597794	25
1400	135.5	1.604565	24.8
1500	136.4	1.608556	25.3
1600	137.2	1.613719	24.1
1700	138.0	1.618937	24
1800	138.8	1.623218	24.4
1900	139.7	1.627489	25
2000	140.5	1.630977	25.2



ผลการทดสอบต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุผิวทางเก่าผสมซีเมนต์พอลิเมอร์  
ชนิด SBR ประเภทไม่แช่น้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	RAP-CSBR (Unsoak)	Unsoak	31:05:2021
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	160		
	*		
0.416096	% strain during conditioning		
Seconds	StresskPa	Strain%	TC-1
2	224	0.259053	25.1
4	221.1	0.321817	24.1
6	217.5	0.363919	24.3
8	212.7	0.39936	24.4
10	207.2	0.43081	24.6
20	179.1	0.550401	24.7
40	159.8	0.689779	24.1
60	159.7	0.750373	24
80	159.6	0.78881	24.7
100	159.7	0.815745	25
200	159.8	0.900146	24.7
300	160.3	0.946109	25
400	160.2	0.978055	24.2
500	159.8	1.002258	24.6
600	159.8	1.021545	24.3
700	159.7	1.036429	24.9
800	160	1.050763	24.8
900	159.8	1.064093	24.2
1000	160.3	1.07356	25.2
1100	159.8	1.082228	25.1
1200	159.6	1.090495	24.2
1300	159.6	1.098497	24.4
1400	159.6	1.106278	25.2
1500	159.6	1.113292	24.8
1600	159.9	1.119327	25.1
1700	159.6	1.124391	25.2
1800	159.6	1.130195	24
1900	159.6	1.134096	24.9
2000	159.9	1.138884	24.9

ผลการทดสอบต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุผิวทางเก่าผสมซีเมนต์พอลิเมอร์  
ชนิด SBR ประเภท แชน้ำ

Uniaxial Creep Test			
Sample	RAP -CSBR (Soak)	soak	31:05:2021
Name	H.Airadapron		
Stress (Kpa)	140		
0.751121	train during conditioning		
Seconds	StresskPa	Strain%	TC-1
2	130.3	0.75999	25
4	137.6	0.81191	25
6	140	0.845976	25.1
8	141.4	0.873033	24
10	142.1	0.895233	24.4
20	142.4	0.967387	24.6
40	140.2	1.047048	25
60	140.1	1.090381	24.7
80	140.1	1.119066	24
100	140.1	1.140595	25
200	140	1.195223	24.9
300	140	1.217418	24.1
400	140.1	1.229078	24.9
500	140	1.236314	24.5
600	140	1.237244	24
700	140.1	1.237905	24.2
800	140.1	1.238804	24.1
900	140	1.239745	24.8
1000	140.1	1.239438	24.6
1100	140	1.240336	24.4
1200	140.1	1.239834	24.5
1300	139.8	1.239702	24.7
1400	139.9	1.239041	24.5
1500	139.8	1.23892	25.1
1600	139.7	1.235305	24.2
1700	140.4	1.235431	24.4
1800	140	1.236594	24.2
1900	139.7	1.235823	24.2
2000	139.9	1.235823	24.2



ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบด้านประสิทธิภาพความชื้น

มหาวิทยาลัยสุรินทร์



ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดิน  
(Capillary Rise Test)

มหาวิทยาลัยพระนคร

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดินของวัสดุดินปลายตะแกรง

Project	การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง			
<b>Capillary Rise Test</b>				
Test By	Iradapron	Date	22/3/2564	
Material	ดินปลายตะแกรง			
QB: Quarry by Product				
Type	QB	QB-C	QB-CSA	QB-CSBR
Sample Height (cm)	11.6	11.6	11.5	11.5
Time	Height (cm)			
0 min	1	1	1	1
5 min	3	2.5	2.5	2.6
10 min	4	3	3.2	3.3
15 min	4.3	3.3	3.8	3.5
20 min	4.6	3.5	4	3.7
30 min	5.5	3.9	4.2	3.9
60 min	7	5	5	4.2
120 min	8.5	6	5.5	5.2
4 hr	8.5	6.0	6.5	7
8 hr	8.5	6.0	7.8	8.2
16 hr	8.5	6.0	11.5	11.5
32 hr	8.5	6.0	11.5	11.5
64 hr	8.5	6.0	11.5	11.5
72 hr	8.5	6.0	11.5	11.5



**ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลหินของวัสดุผิวทางเก่า**

<b>Project</b>	การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของหินที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง												
<b>Test By</b>	Iradapron												
<b>Material</b>	หินคลุก												
	<b>Capillary Rise Test</b>												
	Date 22/3/2564												
<b>Type</b>	<b>RAP</b>			<b>RAP-C</b>			<b>RAP-CSA</b>			<b>RAP-CSBR</b>			
<b>Sample No.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>Avg</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>Avg</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>Avg</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>Avg</b>	
<b>Sample Height (cm)</b>	<b>11.7</b>	<b>11.9</b>	<b>11.8</b>	<b>11.9</b>	<b>11.8</b>	<b>11.8</b>	<b>12.0</b>	<b>11.9</b>	<b>11.8</b>	<b>11.9</b>	<b>11.9</b>	<b>11.8</b>	
<b>Time</b>	Height (cm)												
<b>0 min</b>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
<b>5 min</b>	1.8	1.7	1.8	1.7	1.6	1.7	1.5	1.6	1.6	1.5	1.4	1.5	
<b>10 min</b>	2.2	2.1	2.2	1.8	2.0	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.9	1.9	
<b>15 min</b>	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.2	2.5	2.4	1.9	2.1	2.0	
<b>20 min</b>	2.6	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5	2.6	2.6	2.0	2.2	2.1	
<b>30 min</b>	2.9	3.0	3.0	2.8	2.9	2.9	2.7	2.7	2.7	2.2	2.5	2.4	
<b>60 min</b>	3.3	3.4	3.4	3.1	3.5	3.3	3.0	2.9	3.0	2.4	2.7	2.6	
<b>120 min</b>	3.8	3.9	3.9	3.5	4.2	3.9	3.0	3.0	3.0	2.6	3.0	2.8	
<b>4 hr</b>	4.3	5.0	4.7	4.0	4.5	4.3	3.0	3.0	3.0	2.8	3.1	3.0	
<b>8 hr</b>	6.2	5.9	6.1	4.5	4.9	4.7	3.3	3.4	3.4	3.1	3.4	3.3	
<b>16 hr</b>	7.0	7.4	7.2	6.0	5.8	5.9	3.4	3.5	3.5	3.3	3.5	3.4	
<b>32 hr</b>	7.7	8.4	8.1	6.1	6.0	6.1	3.4	3.5	3.5	3.4	3.6	3.5	
<b>64 hr</b>	8.1	9.0	8.6	6.6	6.4	6.5	3.4	3.5	3.5	3.6	3.8	3.7	
<b>72 hr</b>	8.2	9.3	8.8	6.8	6.7	6.8	3.7	3.7	3.7	3.8	3.9	3.9	





### ผลการทดสอบความทนทาน (Durability Test) ของวัสดุดินปลાયตะแกรง

Project การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง								
Durability Test								
Test By Iradapron			Date 22/5/2564					
Material ดินปลાયตะแกรง								
% Water by mass	QB		QB-C		QB-CSA		QB-CSBR	
TRIAL NO.	1	2	1	2	1	2	1	2
WET SOIL + CAN,	พังทลาย		พังทลาย		73.942	50.725	54.721	59.237
DRY SOIL + CAN,					70.268	48.674	52.803	56.770
WT. OF CAN,					22.578	22.275	22.770	22.666
WT. OF WATER,					3.674	2.051	1.918	2.467
WT. OF DRY SOIL,					47.690	26.399	30.033	34.104
WATER CONTENT					7.704	7.769	6.386	7.234
WT. OF SOIL + MOLD,					6183	6200	6357	6307
WT. OF MOLD,					4187	4187	4187	4187
WT. OF SOIL IN MOLD,					1996	2013	2170	2120
WET DENSITY,					2.114	2.132	2.299	2.246
DRY DENSITY,					1.963	1.979	2.161	2.094
wieght sample					1996	1978	1996	1978
Hight sample					115.500	115.300	1996	1978
Dia. Sample					101.5	101.9	101.68	101.78

### ผลการทดสอบความทนทาน (Durability Test) ของวัสดุดินปลายตะแกรง

Project การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง									
Durability Test									
Test By Iradapron		Date 22/5/2564							
Material ดินปลายตะแกรง									
ครั้งที่	น้ำหนัก	QB (1)	QB (2)	QB-C (1)	QB-C (2)	QB-CSA (1)	QB-CSA (2)	QB-CSBR (1)	QB-CSBR (2)
						1,996	1,872	2,018	1,978
1	หลังแช่					2,096	2,053	2,148	2,189
	หลังอบ					1,924	1,865	2,016	2,062
	หลังขัด					ไม่ขีด	1,793	ไม่ขีด	2,048
2	หลังแช่					2,073	1,932	2,145	2,167
	หลังอบ					1,900	1,283	1,999	2,033
	หลังขัด					ไม่ขีด	1,151	ไม่ขีด	2,023
3	หลังแช่					2,057	1,243	2,133	2,151
	หลังอบ					1,867	1,115	1,995	2,008
	หลังขัด					ไม่ขีด	1,036	ไม่ขีด	2,001
4	หลังแช่					2,037	1,152	2,125	2,144
	หลังอบ					1,843	1,027	1,993	1,979
	หลังขัด					ไม่ขีด	903	ไม่ขีด	1,975
5	หลังแช่					2,020	998	2,111	2,134
	หลังอบ					1,836	891	1,990	1,982
	หลังขัด					ไม่ขีด	848	ไม่ขีด	1,980
6	หลังแช่					2,009	939	2,105	2,130
	หลังอบ					1,832	848	1,988	1,998
	หลังขัด	พังทลาย	พังทลาย	พังทลาย	พังทลาย	ไม่ขีด	843	ไม่ขีด	1,995
7	หลังแช่					1,980	-	2,098	2,121
	หลังอบ					1,809	-	1,985	1,993
	หลังขัด					ไม่ขีด	-	ไม่ขีด	1,992
8	หลังแช่					1,966	-	2,093	2,118
	หลังอบ					1,778	-	1,983	1,969
	หลังขัด					ไม่ขีด	-	ไม่ขีด	1,967
9	หลังแช่					1,940	-	2,090	2,086
	หลังอบ					1,757	-	1,980	1,927
	หลังขัด					ไม่ขีด	-	ไม่ขีด	1,914
10	หลังแช่					908	-	2,088	2,065
	หลังอบ					1,732	-	1,978	1,909
	หลังขัด					ไม่ขีด	-	ไม่ขีด	1,897
11	หลังแช่					1,885	-	2,086	2,038
	หลังอบ					1,705	-	1,960	1,901
	หลังขัด					ไม่ขีด	-	ไม่ขีด	1,896
12	หลังแช่					-	-	-	-
	หลังอบ					-	-	-	-
	หลังขัด					ไม่ขีด	-	ไม่ขีด	-

### ผลการทดสอบความทนทาน (Durability Test) ของวัสดุหินคลุก

Project การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง								
Durability Test								
Test By Iradapron			Date 1/6/2564					
Material หินคลุก								
% Water by mass	QB		QB-C		QB-CSA		QB-CSBR	
TRIAL NO.	1	2	1	2	1	2	1	2
WET SOIL + CAN,	97.360	101.370	152.190	159.230	159.160	156.220	158.650	143.490
DRY SOIL + CAN,	93.420	97.190	147.590	154.260	156.320	152.950	154.660	140.100
WT. OF CAN,	15.105	18.083	24.739	25.912	16.755	16.643	16.376	17.780
WT. OF WATER,	3.940	4.180	4.600	4.970	2.840	3.270	3.990	3.390
WT. OF DRY SOIL,	78.315	79.107	122.851	128.348	139.565	136.307	138.284	122.320
WATER CONTENT	5.031	5.284	3.744	3.872	2.035	2.399	2.885	2.771
WT. OF SOIL + MOLD,	6022	5985	5970	5988	5836	5856	5924	5964
WT. OF MOLD,	3688	3678	3678	3678	3678	3678	3678	3678
WT. OF SOIL IN MOLD,	2334	2307	2292	2310	2158	2178	2246	2286
WET DENSITY,	2.472	2.444	2.428	2.447	2.286	2.307	2.379	2.422
DRY DENSITY,	2.354	2.321	2.340	2.356	2.240	2.253	2.313	2.356
wieght sample	1145	1132	1107	1190	1201	1185	1189	1176
Hight sample	119.860	118.540	121.180	120.500	119.600	118.000	120.100	121.780
Dia. Sample	102.1	101.86	101.58	101.88	101.5	101.9	101.68	101.78

### ผลการทดสอบความทนทาน (Durability Test) ของวัสดุหินคลุก

Project การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง									
Durability Test									
Test By Iradapron		Date 1/6/2564							
Material หินคลุก									
ครั้งที่	น้ำหนัก	CR (1)	CR (2)	CR-C (1)	CR-C (2)	CR-CSA (1)	CR-CSA (2)	CR-CSBR (1)	CR-CSBR (2)
				2187	2204	2093	2084	2145	2181
1	หลังแช่	พังทลาย	พังทลาย	2285	2311	2206	2213	2259	2296
	หลังอบ	-	-	2168	2195	2068	2084	2142	2191
	หลังขัด	-	-	ไม่ขีด	2173	ไม่ขีด	2052	ไม่ขีด	2177
2	หลังแช่	-	-	2275	2274	2193	2166	2242	2275
	หลังอบ	-	-	2167	2173	2067	2052	2139	2183
	หลังขัด	-	-	ไม่ขีด	2162	ไม่ขีด	2039	ไม่ขีด	2178
3	หลังแช่	-	-	2274	2266	2183	2146	2238	2268
	หลังอบ	-	-	2167	2166	2067	2041	2138	2184
	หลังขัด	-	-	ไม่ขีด	2160	ไม่ขีด	2035	ไม่ขีด	2181
4	หลังแช่	-	-	2271	2256	2181	2139	2253	2259
	หลังอบ	-	-	2167	2159	2066	2036	2137	2181
	หลังขัด	-	-	ไม่ขีด	2155	ไม่ขีด	2028	ไม่ขีด	2177
5	หลังแช่	-	-	2274	2253	2178	2131	2231	2259
	หลังอบ	-	-	2167	2151	2063	2026	2129	2173
	หลังขัด	-	-	ไม่ขีด	2148	ไม่ขีด	2022	ไม่ขีด	2171
6	หลังแช่	-	-	2272	2249	2176	2126	2226	2259
	หลังอบ	-	-	2166	2152	2063	2023	2127	2175
	หลังขัด	-	-	ไม่ขีด	2149	ไม่ขีด	2020	ไม่ขีด	2174
7	หลังแช่	-	-	2271	2247	2175	2121	2224	2258
	หลังอบ	-	-	2165	2146	2060	2018	2127	2168
	หลังขัด	-	-	ไม่ขีด	2142	ไม่ขีด	2013	ไม่ขีด	2167
8	หลังแช่	-	-	2269	2240	2174	2115	2223	2255
	หลังอบ	-	-	2165	2144	2058	2014	2127	2173
	หลังขัด	-	-	ไม่ขีด	2142	ไม่ขีด	2010	ไม่ขีด	2171
9	หลังแช่	-	-	2268	2238	2169	2109	2221	2253
	หลังอบ	-	-	2164	2142	2057	2009	2125	2172
	หลังขัด	-	-	ไม่ขีด	2139	ไม่ขีด	2004	ไม่ขีด	2171
10	หลังแช่	-	-	2268	2237	2169	2105	2223	2255
	หลังอบ	-	-	2164	2139	2057	2006	2124	2168
	หลังขัด	-	-	ไม่ขีด	2136	ไม่ขีด	2003	ไม่ขีด	2167
11	หลังแช่	-	-	2268	2230	2166	2099	2220	2252
	หลังอบ	-	-	2164	2134	2054	1999	2124	2169
	หลังขัด	-	-	ไม่ขีด	2131	ไม่ขีด	1995	ไม่ขีด	2168
12	หลังแช่	-	-	2267	2227	2165	2093	2221	2252
	หลังอบ	-	-	2164	2131	2054	1995	2123	2168
	หลังขัด	-	-	ไม่ขีด	2122	ไม่ขีด	1991	ไม่ขีด	2166

ผลการทดสอบความทนทาน (Durability Test) ของวัสดุผิวทางเก่า

Project การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง								
Durability Test								
Test By Iradapron			Date 20/6/2564					
Material วัสดุผิวทางเก่า								
% Water by mass	RAP		RAP-C		RAP-CSA		RAP-CSBR	
TRIAL NO.	1	2	1	2	1	2	1	2
WET SOIL + CAN,	134.830	139.220	115.680	130.530	146.410	123.310	148.560	142.010
DRY SOIL + CAN,	128.190	132.310	111.390	124.980	141.840	119.980	143.300	137.420
WT. OF CAN,	16.890	16.590	16.760	16.460	17.910	17.800	26.890	17.160
WT. OF WATER,	6.640	6.910	4.290	5.550	4.570	3.330	5.260	4.590
WT. OF DRY SOIL,	111.300	115.720	94.630	108.520	123.930	102.180	116.410	120.260
WATER CONTENT	5.966	5.971	4.533	5.114	3.688	3.259	4.519	3.817
WT. OF SOIL + MOLD,	5836	5823	5890	5876	5728	5728	5812	5773
WT. OF MOLD,	3679	3678	3678	3678	3678	3678	3678	3678
WT. OF SOIL IN MOLD,	2157	2145	2212	2198	2050	2050	2134	2095
WET DENSITY,	2.285	2.272	2.343	2.328	2.172	2.172	2.261	2.219
DRY DENSITY,	2.156	2.144	2.242	2.215	2.094	2.103	2.163	2.138
wieght sample	1145	1132	1107	1190	1201	1185	1189	1176
Hight sample	116.800	117.180	118.100	118.700	120.460	117.580	120.080	120.080
Dia. Sample	101.58	101.48	101.38	101.58	101.78	102.04	101.48	101.6

### ผลการทดสอบความทนทาน (Durability Test) ของวัสดุผิวทางเก่า

Project การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและประสิทธิภาพของดิน ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์สำหรับงานทาง									
Durability Test									
Test By Iradapron		Date 20/6/2564							
Material วัสดุผิวทางเก่า									
ครั้งที่	น้ำหนัก	RAP (1)	RAP (2)	RAP-C (1)	RAP-C (2)	RAP-CSA (1)	RAP-CSA (2)	RAP-CSBR (1)	RAP-CSBR (2)
1	หลังแฉ่	2038	2038	2101	2086	1948	1948	2049	2015
	หลังอบ	1933	1933	2177	2166	2041	2015	2116	2085
	หลังขีด	ไม่ขีด	1921	ไม่ขีด	2065	ไม่ขีด	1939	ไม่ขีด	1997
2	หลังแฉ่	-	2020	2176	2164	2040	2016	2116	2084
	หลังอบ	-	1916	2088	2070	1939	1941	2043	2000
	หลังขีด	-	1904	ไม่ขีด	2067	ไม่ขีด	1938	ไม่ขีด	1999
3	หลังแฉ่	-	2001	2176	2158	2040	2010	2115	2083
	หลังอบ	-	1902	2088	2067	1939	1938	2043	1998
	หลังขีด	-	1895	ไม่ขีด	2064	ไม่ขีด	1935	ไม่ขีด	1997
4	หลังแฉ่	-	1984	2176	2151	2038	2009	2115	2077
	หลังอบ	-	1890	2087	2070	1939	1939	2043	2004
	หลังขีด	-	1884	ไม่ขีด	2066	ไม่ขีด	1937	ไม่ขีด	2002
5	หลังแฉ่	-	1978	2176	2150	2036	2009	2115	2084
	หลังอบ	-	1883	2087	2063	1939	1936	2043	2000
	หลังขีด	-	1873	ไม่ขีด	2061	ไม่ขีด	1934	ไม่ขีด	1999
6	หลังแฉ่	-	1963	2176	2149	2039	2007	2114	2081
	หลังอบ	-	1871	2087	2065	1939	1938	2043	2005
	หลังขีด	-	1868	ไม่ขีด	2064	ไม่ขีด	1937	ไม่ขีด	2004
7	หลังแฉ่	-	1957	2176	2147	2035	2011	2114	2087
	หลังอบ	-	1866	2086	2059	1939	1934	2043	1999
	หลังขีด	-	1862	ไม่ขีด	2057	ไม่ขีด	1933	ไม่ขีด	1998
8	หลังแฉ่	-	1949	2175	2143	2035	2008	2114	2078
	หลังอบ	-	1861	2086	2062	1938	1936	2043	2000
	หลังขีด	-	1858	ไม่ขีด	2061	ไม่ขีด	1935	ไม่ขีด	1999
9	หลังแฉ่	-	1948	2175	2144	2033	2010	2108	2082
	หลังอบ	-	1857	2085	2055	1938	1931	2042	1995
	หลังขีด	-	1853	ไม่ขีด	2054	ไม่ขีด	1929	ไม่ขีด	1994
10	หลังแฉ่	-	1944	2175	2143	2031	2009	2108	2078
	หลังอบ	-	1848	2080	2055	1937	1932	2042	1995
	หลังขีด	-	1846	ไม่ขีด	2054	ไม่ขีด	1931	ไม่ขีด	1995
11	หลังแฉ่	-	1933	2175	2139	2029	2010	2108	2079
	หลังอบ	-	1844	2078	2052	1936	1929	2041	1993
	หลังขีด	-	1841	ไม่ขีด	2051	ไม่ขีด	1927	ไม่ขีด	1992
12	หลังแฉ่	-	1929	2175	2140	2028	2010	2106	2077
	หลังอบ	-	1841	2078	2051	1936	1928	2041	1992
	หลังขีด	-	1835	ไม่ขีด	2049	ไม่ขีด	1927	ไม่ขีด	1992