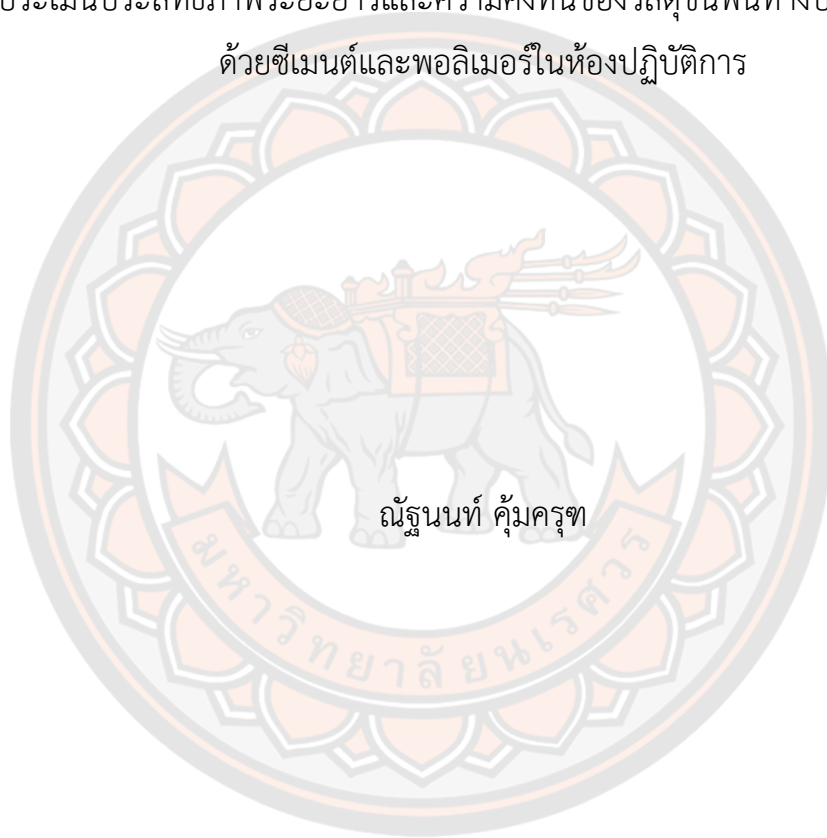




การประเมินประสิทธิภาพพระยะยาวและความคงทนของวัสดุชั้นพื้นทางปรับปรุงคุณภาพ
ด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ในห้องปฏิบัติการ



ณัฐนนท์ คุ่มครุฑ

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การประเมินประสิทธิภาพพระยะยาวและความคงทนของวัสดุชั้นพื้นทางปรับปรุงคุณภาพ
ด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ในห้องปฏิบัติการ



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏ
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยราชภัฏ

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การประเมินประสิทธิภาพระยะยาวและความคงทนของวัสดุชั้นพื้นทางปรับปรุง
คุณภาพด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ในห้องปฏิบัติการ"

ของ ณิชฐนนท์ คุ้มครุฑ

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

----- ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม)

----- ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ นุสสิทธิ์)

----- กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว)

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

อนุมัติ

(รองศาสตราจารย์ ดร.กรองกาญจน์ ชูทิพย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การประเมินประสิทธิภาพระยะยาวและความคงทนของวัสดุชั้นพื้นทางปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ในห้องปฏิบัติการ
ผู้วิจัย	ณัฐนนท์ คุ่มครุฑ
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ นุสิทธิ์
กรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วศ.ม. วิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2565
คำสำคัญ	การทดสอบแบบไม่ทำลาย, การทดสอบด้วยคลื่นความถี่เรโซแนนท์, การปรับปรุงคุณภาพวัสดุงานทาง, ดินซีเมนต์พอลิเมอร์

บทคัดย่อ

ปัญหาน้ำท่วมขังสายทางในประเทศไทยเกิดขึ้นเป็นประจำทุกปี ส่งผลให้โครงสร้างทางที่ก่อสร้างด้วยวัสดุงานทาง ทั้งนี้ เนื่องจากวัสดุงานทางไม่สามารถทนทานความชื้นได้นานนัก เพื่อให้วัสดุงานทางมีความทนทานต่อความชื้นเพิ่มขึ้น ปัจจุบัน นิยมใช้ ซีเมนต์และพอลิเมอร์ ผสมเพิ่มเติมลงไป ในวัสดุงานทาง นอกจากจะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงขึ้นแล้ว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ประเมินประสิทธิภาพระยะยาวและความคงทนของชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และซีเมนต์พอลิเมอร์จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและ (2) การประเมินคุณสมบัติด้านกำลังและด้านกายภาพชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมและแบบไม่ทำลายจากตัวอย่างที่จำการเสื่อมสภาพด้วยการทดสอบเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying) โดยส่วนผสมที่ศึกษาในงานวิจัยชิ้นนี้ ประกอบด้วย หินคลุกผสมซีเมนต์ (PMC) หินคลุกผสมซีเมนต์พอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก (PMCSA) และ หินคลุกผสมซีเมนต์พอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอีน (PMCSBR) ปริมาณซีเมนต์และพอลิเมอร์ที่เหมาะสมจะได้รับการออกแบบตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวง บ่มตัวอย่างในภาชนะปิดเป็นเวลา 7 วันจากนั้นทำการจำลองการเสื่อมสภาพโดยวิธีเปียกสลับแห้งก่อนทำการทดสอบด้วยคลื่นความถี่เรโซแนนท์และทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว, การทดสอบการรับกำลังดึงทางอ้อมและการทดสอบความคงทนต่อความล้าของวัสดุ นอกจากนี้ยังทำการทดสอบความคงทนของวัสดุได้แก่การทดสอบ Erodibility, การทดสอบการดูดซึมน้ำ โดยผลการทดสอบแบบทำลายตัวอย่างพบว่าทั้ง 3 วัสดุเมื่อผ่านการทดสอบเปียกสลับแห้งวัสดุจะมีการพัฒนากำลังในช่วง 0-6 cycles และหลังจากนั้นวัสดุจะมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงโดย PMC ลดลงร้อยละ 20 PMCSA ลดลงร้อยละ 38 และ PMCSBR ลดลงร้อยละ 14 ผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่นพบว่า เมื่อตัวอย่างผ่านการทดสอบเปียกสลับแห้ง วัสดุ PMC จะมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 21 ส่วนวัสดุ PMCSA ลดลงร้อยละ 41 ส่วนวัสดุชนิด PMCSBR จะมีค่าเพิ่มร้อยละ 4 วัสดุชนิด PMCSBR สามารถปรับปรุง

คุณภาพในด้านความแข็งแรงและคงทนต่อความล้าของวัสดุงานทางได้อย่างมีประสิทธิภาพนอกจากนี้
วัสดุชนิด PMCSBR ยังช่วยลดการสูญเสียน้ำหนักจากการทดสอบต่างๆ



Title	LABORATORY ASSESSMENT FOR LONG-TERM PERFORMANCE AND DURABILITY OF CEMENT-POLYMER STABILIZED ROAD BASE
Author	Nattanon Khumkud
Advisor	Assistant Professor Korakod Nusit
Co-Advisor	Assistant Professor Susit Chaiprakaikeow
Academic Paper	M.Eng. Thesis in Civil Engineering, Naresuan University, 2022
Keywords	Stabilized pavement materials, Moisture-damage Resistance, Wetting and Drying, Cement-polymer stabilized soil, Non-destructive Test, Free-Free Resonance Test

ABSTRACT

The number and frequency of flooding events in Thailand are continually rising due to the effects of climate change. Severe floods may destroy or damage the infrastructure; accordingly, the collapses of road structures may be observed within a few days after flooding. The reason is that road construction materials are easily damaged by moisture ingress. Mechanical and chemical stabilization techniques are usually employed to improve the moisture-damage resistance of pavement materials; however, the effects of wetting and drying cycle on the strength losses of stabilized pavement materials are rarely explored. This research, therefore, investigates the strength reduction characteristic of cement-polymer stabilized road base under the wetting and drying test. Two types of liquid polymers were used in this research, which were the styrene acrylic polymer and styrene butadiene rubber. The crushed rock material was employed as the parent material and represents a conventional road base. The optimum amount of cement and polymer were determined based on the department of highway standard. The wetting and drying test was, then, used to simulate the flooding and drying environment in the field. After that, the material strengths were determined from the samples that subjected to different cycles of wetting and drying simulation. The FFR test before The strength tests conducted in this research are the unconfined compressive strength test, the

indirect tensile strength test, and the fatigue test. The UCS of stabilized pavement materials decreased with the increase in number of wetting and drying cycle; while the IDT strength of stabilize pavement materials continually rising, although they were subjected to the wetting and drying simulation. The samples stabilized with cement and SBR showed the highest improvement in indirect tensile strength and fatigue life, while the greatest unconfined compressive strength was observed from the sample stabilized with cement only.



ประกาศคุณูปการ

งานวิจัยนี้ ส่วนหนึ่งได้รับเงินสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร (ทุนสนับสนุนการศึกษาสำหรับนิสิตระดับปริญญาโท ประจำปีการศึกษา 2563) ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ ผศ. ดร.กรกฎ นุสิทธิ์ ที่ปรึกษาโครงการ ที่คอยสนับสนุนและให้คำปรึกษาทำให้งานวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จเป็นอย่างดี และ ผศ.ดร.สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบ Free-Free Resonance: FFR และขอขอบคุณ โรงโม่บ้านศิลา จังหวัดสุโขทัยที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุหินคลุกสำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ นายภูริชัย แก้วมา นายณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์ และ นางสาวไอรดาภรณ์ หาดแก้ว นิสิตปริญญาโท มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่คอยช่วยเหลือในการให้คำปรึกษาในทุกปัญหาตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ณัฐนนท์ คุ่มครุฑ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
ประกาศคุณูปการ	ช
สารบัญ	ช
สารบัญภาพ.....	๗
สารบัญตาราง.....	๗
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 แผนการดำเนินงาน	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 โครงสร้างชั้นทางและการออกแบบ.....	5
2.1.1 โครงสร้างทางและแนวทางการออกแบบ	6
2.1.2 การออกแบบชั้นพื้นทาง (Base course).....	7
2.2 ผลกระทบของวัสดุชั้นทางที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อประสิทธิภาพของผิวทาง.....	8
2.2.1 ประเภทความเสียหายของผิวทาง.....	8

2.3 การปรับปรุงคุณภาพวัสดุงานทางในปัจจุบัน	11
2.3.1 การปรับปรุงคุณภาพชั้นทางด้วยซีเมนต์	12
2.3.2 การปรับปรุงคุณภาพชั้นทางด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์	13
2.4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	15
2.4.1 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ	15
2.4.2 การจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทาง	20
2.4.3 การทดสอบคุณสมบัติด้านการรับกำลังของวัสดุ	21
2.4.4 การทดสอบความคงทนต่อความชื้น (Erodibility)	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	29
3.1 แผลงผังวิธีการดำเนินงาน	29
3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	30
3.2.1 วัสดุมวลรวม	30
3.2.2 วัสดุผสมเพิ่ม (พอลิเมอร์)	30
3.2.3 ปูนซีเมนต์ (Cement)	32
3.3 การทดสอบคุณสมบัติมวลรวม (หินคลุก)	32
3.3.1 การทดสอบหาค่าการสึกกร่อนด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion	32
3.3.2 ทดสอบการหาค่าความคงทน (Soundness) ของมวลรวม	33
3.3.3 การทดสอบหาขนาดละเอียดของมวลรวมโดยการร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) แบบล้าง	35
3.3.4 การทดสอบค่า Liquid Limits	36
3.3.5 การทดสอบหาค่า Plastic Limit (PL) และ Plasticity Index (PI)	37
3.3.6 การทดสอบ California Bearing Ratio Test: CBR	38

3.4 การออกแบบอัตราส่วนผสมชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์	38
3.4.1 การทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน.....	39
3.4.2 การออกแบบอัตราส่วนผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ที่เหมาะสม	40
3.5 การเปรียบเทียบค่าขนาดตัวอย่างที่แตกต่างกัน	41
3.5.1 ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน D/L เท่ากับ 0.87	41
3.5.2 ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน D/L เท่ากับ 0.64	41
3.5.3 ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน D/L เท่ากับ 0.5	41
3.6 การจำลองการเสื่อมสภาพของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุง	42
3.6.1 การทดสอบความทนทาน (Durability Test) โดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying).....	42
3.7 การทดสอบคุณสมบัติด้านการรับกำลังของวัสดุที่ผ่านการจำลองการเสื่อมสภาพโดยวิธีทดสอบ Wetting & drying.....	43
3.7.1 การทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength: UCS).....	43
3.7.2 การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength: IDT).....	44
3.7.3 การทดสอบ Seismic Modulus Test (Free-Free Resonance: FFR).....	45
3.7.4 การทดสอบ Fatigue Strength Test	45
3.8 การทดสอบความคงทนต่อความชื้นของหินคลุกที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์.....	46
3.8.1 การทดสอบ Erodibility Tests	46
3.8.2 การทดสอบ Capillary rise and Absorption	48
3.9 การวิเคราะห์ผล	48
บทที่ 4	50

ผลการวิจัย	50
4.1 คุณสมบัติวัสดุหินคลุก	50
4.2 การออกแบบส่วนผสมวัสดุงานทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และซีเมนต์พอลิเมอร์ ..	50
4.2.1 การออกแบบหาปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม	51
4.2.2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุหินคลุก	52
4.3 ผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ FFR ที่ขนาดตัวอย่างแตกต่างกัน	54
4.4 ผลการศึกษาการจำลองการเสื่อมสภาพของวัสดุหินคลุกที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์และซีเมนต์พอลิเมอร์	59
4.4.1. ผลการทดสอบการจำลองการเสื่อมสภาพของวัสดุโดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wetting&Drying)	59
4.4.2. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว	61
4.4.2.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวตัวอย่างควบคุม	61
4.4.2.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบไม่ผ่านการขัด (W&D).....	62
4.4.2.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบผ่านการขัด (Brush).....	63
4.4.3. ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม.....	63
4.4.3.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมตัวอย่างควบคุม	64
4.4.3.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม ตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบไม่ผ่านการขัด (W-D)	65
4.4.3.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม ตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบผ่านการขัด (Brush)	66
4.4.4. ผลการทดสอบความคงทนต่อความล้า (Fatigue) ของวัสดุงานทาง	67

4.4.5 ผลการทดสอบ Seismic Modulus Test โดยวิธี Free-Free Resonance: FFR..	68
4.4.5.1 ผลการทดสอบความเร็วคลื่นอัด (P-Wave Velocity) โดยวิธี Free-Free Resonance.....	69
4.4.5.2 ผลการทดสอบความเร็วคลื่นเฉือน (S-Wave Velocity) โดยวิธี Free-Free Resonance	74
4.5 การประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีดั้งเดิมและแบบไม่ทำลายจากตัวอย่างที่จำการเสื่อมสภาพด้วยการทดสอบเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying).....	80
4.6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพความคงทนต่อความชื้นของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และซีเมนต์พอลิเมอร์	83
4.6.1 ผลการทดสอบ Erodibility Tests.....	83
4.6.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Capillary Rise Test)	84
4.7 พฤติกรรมของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์และซีเมนต์พอลิเมอร์เมื่อผ่านการจำลองการเสื่อมสภาพด้วยวิธี Wetting and Drying Test.....	85
บทที่ 5	96
5.1 ประเมินประสิทธิภาพระยะยาวและความคงทนของชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และซีเมนต์พอลิเมอร์จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	96
5.2 การประเมินคุณสมบัติชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมและแบบไม่ทำลายจากตัวอย่างที่จำการเสื่อมสภาพด้วยการทดสอบเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying).....	97
ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	98
บรรณานุกรม	100
ภาคผนวก ก.	104
ภาคผนวก ข.	117

ภาคผนวก ค.....	122
ภาคผนวก ง.....	132
ประวัติผู้วิจัย.....	144



สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2-1	รูปแบบโครงสร้างชั้นทางแบบหยุ่นตัว (Flexible Pavement).....	5
รูปที่ 2-2	การแผ่กระจายของหน่วยแรงในแนวตั้งที่กระทำต่อโครงสร้างทางที่ความลึกต่างกัน	6
รูปที่ 2-3	รอยแตกหนังจระเข้.....	9
รูปที่ 2-4	สภาพโครงสร้างทางที่เกิดการสึกกร่อน	10
รูปที่ 2-5	ความเสียหายประเภทร่องล้อ.....	11
รูปที่ 2-6	การก่อสร้างชั้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์.....	12
รูปที่ 2-7	กราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน	16
รูปที่ 2-8	กราฟความชันเหลวของมวลดิน (Consistency Limit Graph).....	16
รูปที่ 2-9	กราฟการหา Liquid Limit (LL) อ่านได้จากกราฟ ที่การเคาะ 25 ครั้ง.....	17
รูปที่ 2-10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นและ Dry density.....	19
รูปที่ 2-11	การให้แรงกระทำตัวอย่างและการแตกร้าวของตัวอย่าง	22
รูปที่ 2-12	ตัวอย่างเสนอความสัมพันธ์ระหว่าง stress amplitude และ fatigue life ของตัวอย่าง	24
รูปที่ 2-13	การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ Free-Free Resonance (Guthrie et al., 2002).....	25
รูปที่ 2-14	ตัวอย่างการทดสอบ Erodibility (Fedrigo et al., 2017).....	27
รูปที่ 2-15	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและระยะความสูงของการดูดซึมน้ำในตัวอย่าง	28
รูปที่ 3-1	แผนการดำเนินงานวิจัย	29
รูปที่ 3-2	หินคลุกโรงโม่บ้านศิลา จ.สุโขทัย	30
รูปที่ 3-3	พอลิเมอร์ชนิด Styrene Acrylic (SA)	31

รูปที่ 3-4	พอลิเมอร์ชนิด Styrene-Butadiene Rubber (SBR).....	32
รูปที่ 3-5	เครื่อง Los Angeles Abrasion.....	32
รูปที่ 3-6	การทดสอบ Soundness.....	33
รูปที่ 3-7	เครื่องมือทดสอบหาขนาดคละ	35
รูปที่ 3-8	การทดสอบหาค่า Liquid Limits	36
รูปที่ 3-9	การทดสอบ CBR แบบแช่น้ำ	38
รูปที่ 3-10	แบบตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว $D/L = 0.5$	41
รูปที่ 3-11	เครื่องมือทดสอบกำลังอัดแกนเดียว.....	43
รูปที่ 3-12	การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม	44
รูปที่ 3-13	แสดงรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบความถี่สี่นิ้วพ้อง (a) Transverse และ (b) Longitudinal (วุฒิกฤษณ์ โสพรรณรัตน์ , 2020).....	45
รูปที่ 3-14	การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ Fatigue Strength Test.....	46
รูปที่ 3-15	การทดสอบการทดสอบ Erodibility tests (Fedrigo et al., 2017).....	47
รูปที่ 4-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุหินคลุก	51
รูปที่ 4-2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียวและปริมาณซีเมนต์วัสดุหินคลุก	52
รูปที่ 4-3	กราฟความสัมพันธ์ความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุหินคลุกที่ปรับปรุงซีเมนต์ และซีเมนต์พอลิเมอร์	53
รูปที่ 4-4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัด (P-Wave) และ อายุการบ่มของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้งสองชนิด	54

รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน (S-wave) และอายุการบ่มของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้งสองชนิด	55
รูปที่ 4-6 กราฟแสดงสมการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นอัด (P-wave)	56
รูปที่ 4-7 กราฟแสดงสมการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นเฉือน (S-wave)	57
รูปที่ 4-8 ตัวอย่างที่การทดสอบโดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wetting&Drying).....	59
รูปที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักและWetting & drying cycle....	60
รูปที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักและWetting & drying cycle .60	
รูปที่ 4-11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวตัวอย่างควบคุม	61
รูปที่ 4-12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบไม่ผ่านการขัด (W&D).....	62
รูปที่ 4-13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบผ่านการขัด (Brush).....	63
รูปที่ 4-14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมตัวอย่างควบคุม.....	64
รูปที่ 4-15 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม	65
รูปที่ 4-16 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม.....	66
รูปที่ 4-17 ผลการทดสอบความคงทนต่อความล้า (Fatigue)	67
รูปที่ 4-18 ผลการทดสอบ P-Wave Velocity ตัวอย่างควบคุม (ตัวอย่าง UCS)	69
รูปที่ 4-19 ผลการทดสอบ P-Wave Velocity	69
รูปที่ 4-20 ผลการทดสอบ P-Wave Velocity	70
รูปที่ 4-21 ผลการทดสอบ P-Wave Velocity ตัวอย่างควบคุม (ตัวอย่าง IDT).....	71
รูปที่ 4-22 ผลการทดสอบ P-Wave Velocity	71
รูปที่ 4-23 ผลการทดสอบ P-Wave Velocity	72

รูปที่ 4-24 ผลการทดสอบ P-Wave Velocity ตัวอย่างควบคุม (ตัวอย่าง Fatigue).....	72
รูปที่ 4-25 ผลการทดสอบ P-Wave Velocity	73
รูปที่ 4-26 ผลการทดสอบ P-Wave Velocity	73
รูปที่ 4-27 ผลการทดสอบ S-Wave Velocity ตัวอย่างควบคุม(ตัวอย่าง UCS).....	74
รูปที่ 4-28 ผลการทดสอบ S-Wave Velocity	75
รูปที่ 4-29 ผลการทดสอบ S-Wave Velocity	76
รูปที่ 4-30 ผลการทดสอบ S-Wave Velocity ตัวอย่างควบคุม(ตัวอย่าง IDT)	77
รูปที่ 4-31 ผลการทดสอบ S-Wave Velocity	77
รูปที่ 4-32 ผลการทดสอบ S-Wave Velocity	78
รูปที่ 4-33 ผลการทดสอบ S-Wave Velocity ตัวอย่างควบคุม(ตัวอย่าง Fatigue).....	78
รูปที่ 4-34 ผลการทดสอบ S-Wave Velocity	79
รูปที่ 4-35 ผลการทดสอบ S-Wave Velocity	79
รูปที่ 4-36 ผลลัพธ์ของการทดสอบ Modulus จากการทดสอบด้วยวิธี Sesimic และ Ultrasonic Tests ของวัสดุ Gravel-Cement (Wen et al., 2014).....	81
รูปที่ 4-37 ผลการทดสอบ Shear wave velocity วัสดุที่ปรับปรุงด้วย Cement ผ่าน กระบวนการ WD cycles (Gowthaman et al., 2021).....	81
รูปที่ 4-38 ตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งโดยผ่านการขัด (a) PMC, (b) PMCSA และ (c) PMCSBR.....	82
รูปที่ 4-39 ผลการศึกษาค่าความคงทนของวัสดุที่ผ่านการทดสอบ Erodibility test	83
รูปที่ 4-40 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ(Capillary Rise Test)	84
รูปที่ 4-41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียน้ำหนักสะสมและจำนวน Cycles ของวัสดุ ที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัด (PMCSA).....	85

รูปที่ 4-42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียน้ำหนักสะสมและจำนวน Cycles ของวัสดุ ที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งผ่านการขัด (PMCSA)	85
รูปที่ 4-43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียน้ำหนักสะสมและจำนวน Cycles ของวัสดุ ที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัด (PMCSBR).....	86
รูปที่ 4-44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียน้ำหนักสะสมและจำนวน Cycles ของวัสดุ ที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งผ่านการขัด (PMCSBR)	86
รูปที่ 4-45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ผ่าน กระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัด (PMCSA).....	87
รูปที่ 4-46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ผ่าน กระบวนการเปียกสลับแห้งผ่านการขัด (PMCSA)	87
รูปที่ 4-47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ผ่าน กระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัด (PMCSBR)	88
รูปที่ 4-48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ผ่าน กระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัด (PMCSBR)	88
รูปที่ 4-49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัด (PMCSA).....	89
รูปที่ 4-50 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งผ่านการขัด (PMCSA)	89
รูปที่ 4-51 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัด (PMCSBR).....	90
รูปที่ 4-52 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งผ่านการขัด (PMCSBR).....	90
รูปที่ 4-53 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัด (PMCSA).....	91

รูปที่ 4-54 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งผ่านการขัด (PMCSA)91

รูปที่ 4-55 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัด (PMCSBR).....92

รูปที่ 4-56 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งผ่านการขัด (PMCSBR).....92

รูปที่ 4-57 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัดของวัสดุทั้ง 2 ชนิด93

รูปที่ 4-58 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งผ่านการขัดของวัสดุทั้ง 2 ชนิด.....93

รูปที่ 4-59 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักสะสมและค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัดของวัสดุทั้ง 2 ชนิด.....94

รูปที่ 4-60 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักสะสมและค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งผ่านการขัดของวัสดุทั้ง 2 ชนิด94

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1-1 แผนการดำเนินงาน.....	4
ตารางที่ 2-1 การแยกคุณสมบัติขนาดคละของหินคลุก	8
ตารางที่ 2-2 การประเมินการทดสอบความทนทานวัสดุงานทางผสมซีเมนต์ (Wen et al., 2014).....	21
ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติพื้นฐานวัสดุหินคลุก.....	30
ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติพอลิเมอร์ชนิด Styrene Acrylic (SA).....	31
ตารางที่ 3-3 ขนาดตะแกรงและมวลของมวลรวมเม็ดละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ.....	34
ตารางที่ 3-4 มวลของมวลรวมเม็ดหยาบที่ใช้ในการทดสอบ	34
ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุหินคลุก.....	50
ตารางที่ 4-2 สรุปความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุหินคลุกที่ปรับปรุงซีเมนต์ และซีเมนต์พอลิเมอร์.....	53
ตารางที่ 4-3 สรุปสมการปรับเทียบค่าความเร็วคลื่น.....	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีปัญหาน้ำท่วมขังและสภาพอากาศที่แปรปรวนขึ้นเป็นประจำทุกปี ส่งผลให้โครงสร้างทางที่ก่อสร้างด้วยวัสดุงานทาง เช่น หินคลุก ลูกกรังและดินพังทลายลงภายในไม่กี่วัน หลังที่ถูกน้ำท่วมขัง ทั้งนี้ เนื่องจากวัสดุงานทางไม่สามารถทนทานความชื้นได้นานนัก และสภาพอากาศที่แปรปรวน การปรับปรุงคุณภาพวัสดุพื้นทางนั้นนิยมใช้ซีเมนต์และพอลิเมอร์ ผสมเพิ่มเติมลงไป ในวัสดุงานทางเพื่อให้วัสดุงานทางมีความทนทานต่อความชื้นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงขึ้นแล้ว ยังเชื่อว่าวัสดุงานทางที่ได้รับการปรับปรุงจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น การใช้ซีเมนต์และพอลิเมอร์ปรับปรุงวัสดุงานทางได้รับการศึกษาวิจัยมากกว่า 10 ปี และได้รับการยืนยันว่าสามารถใช้เพิ่มความแข็งแรงของวัสดุงานทางได้จริง

ถึงแม้ว่าการศึกษาและพัฒนางานทางในประเทศไทยโดยนำซีเมนต์และพอลิเมอร์มาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของชั้นพื้นทาง (Base) และชั้นรองพื้นทาง (Sub Base) กำลังเป็นที่นิยมในปัจจุบัน และชี้ให้เห็นว่าการนำพอลิเมอร์มาปรับปรุงคุณภาพงานทางสามารถใช้เพิ่มกำลังรับน้ำหนักและประสิทธิภาพเบื้องต้นของวัสดุงานทางได้อย่างดีและเนื่องจากการออกแบบวัสดุชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ในปัจจุบัน หรือการศึกษาวัดที่ได้รับการปรับปรุงในปัจจุบันนั้น นิยมนำผลของตัวอย่างที่มีอายุบ่ม 7 วันมาวิเคราะห์เพียงอย่างเดียวอย่างไรก็ตามพฤติกรรมและประสิทธิภาพของวัสดุดังกล่าวในระยะยาวยังไม่ได้รับการศึกษาอย่างจริงจังจึงยังไม่มีมาตรฐานการทดสอบในระดับสากลอย่างชัดเจนประกอบกับสภาพอากาศที่แปรปรวนในประเทศไทยยังอาจส่งผลถึงพฤติกรรมระยะยาวของวัสดุมีความแตกต่างจากผลการศึกษาของต่างประเทศทั้งนี้ ประสิทธิภาพในระยะยาวของวัสดุงานทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์จะใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความคุ้มค่าในการใช้สารผสมเพิ่มที่มีราคาแพงมาปรับปรุงคุณภาพวัสดุงานทาง

ผู้วิจัยจึงมีความประสงค์ที่ศึกษา (1) ประเมินประสิทธิภาพระยะยาวและความคงทนของชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (2) การประเมินคุณสมบัติด้านกำลังและด้านกายภาพของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมและแบบไม่ทำลายจากตัวอย่างที่จำลองสภาพด้วยการทดสอบเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying) เพื่อทำให้ถนนในประเทศไทยมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ประเมินประสิทธิภาพระยะยาวและความคงทนของชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.2.2 การประเมินคุณสมบัติด้านกำลังและด้านกายภาพของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมและแบบใหม่ทำลายจากตัวอย่างที่จำการเสื่อมสภาพด้วยการทดสอบเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 วัสดุที่ใช้ในโครงการ

- 1) วัสดุหินคลุกสำหรับใช้เป็นชั้นพื้นทางมาตรฐาน จากโรงม่หินบ้านศิลาพัฒนา จ.สุโขทัย
- 2) พอลิเมอร์ 2 ชนิด ได้แก่ พอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก (SA) และ พอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอีน (SBR)
- 3) ปูนซีเมนต์ (Cement) ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

1.3.2 การออกแบบส่วนผสม

- 1) ห้อตราส่วนผสมความชื้นที่เหมาะสมระหว่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดโดยใช้ห้อตราส่วนน้ำต่อพอลิเมอร์ 50:50 ทำการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction)ตามมาตรฐานกรมทางหลวงตามมาตรฐาน ทล.-ท. 108/2517
- 2) ออกแบบห้อตราส่วนผสมหินคลุกผสมซีเมนต์ ตามมาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์

1.3.3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

- 1) การจำลองการเสื่อมสภาพของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุง

การทดสอบการจำลองการเสื่อมสภาพก่อนตัวอย่างจะถูกทำการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 7 วัน ก่อนนำไปทดสอบโดยวิธีการทดสอบความทนทาน (Durability Test) โดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying) ภายใต้อุณหภูมิมาตรฐาน ASTM D 559 ทำการศึกษาผลกระทบการรับกำลังของก้อนตัวอย่างในรอบการทดสอบต่างๆโดยมีการทดสอบดังนี้

- การทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength)
- การทดสอบ Seismic Modulus Test (Free-Free Resonance)
- การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength)
- การทดสอบ Fatigue Strength Test

2) การทดสอบความคงทนต่อความชื้น

- การทดสอบ Erodibility Tests
- การทดสอบ Capillary rise and Absorption

1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

คุณสมบัติของวัสดุผสมเพิ่มที่มีความคงทนสูงและมีประสิทธิภาพในการรับกำลังที่ดีเพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างทางในอนาคต และเพื่อลดปัญหาการชำรุดของชั้นโครงสร้างที่ส่งผลถึงการเสียหายชั้นผิวทางและเพิ่มอายุการใช้งานของถนนที่ยาวนานขึ้น

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาและค้นคว้าเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศและต่างประเทศ
- 2) คัดเลือกวัสดุที่ใช้ในการทดสอบและทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผสมรวม
- 3) ออกแบบอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมตามมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างชั้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์
- 4) ทดสอบการจำลองการเสื่อมสภาพของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุง
- 5) การทดสอบความคงทนต่อความชื้น
- 6) เปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์และซีเมนต์พอลิเมอร์
- 7) วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดสอบ
- 8) สรุปผลการวิจัย

บทที่ 2

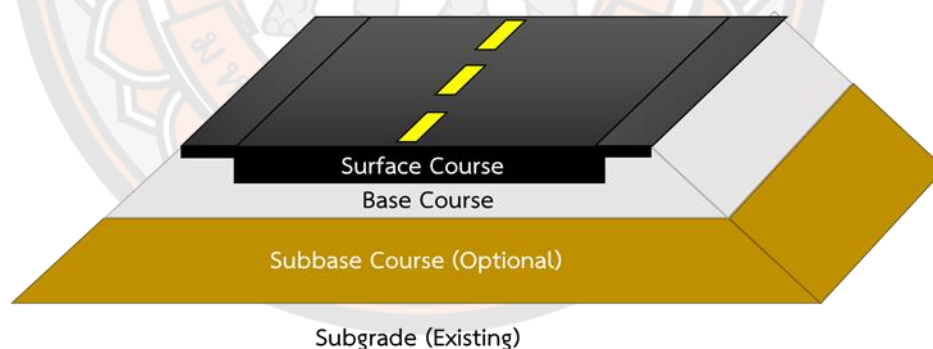
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเรื่องผลกระทบของความชื้นต่อประสิทธิภาพของชั้นพื้นทางที่ได้รับ การปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และ ซีเมนต์พอลิเมอร์ ที่ผ่านการจำลองการเสื่อมสภาพของชั้นพื้นทางโดยวิธี Wet/dry Durability เปรียบเสมือนสภาพอากาศที่แปรปรวนในประเทศไทย ในบทนี้เป็นการทบทวนวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยมีหัวข้อดังนี้

- 2.1 โครงสร้างทางชั้นทางและการออกแบบ
- 2.2 ผลกระทบของวัสดุชั้นทางที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อประสิทธิภาพของผิวทาง
- 2.3 การปรับปรุงคุณภาพวัสดุงานทางในปัจจุบัน
- 2.4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

2.1 โครงสร้างชั้นทางและการออกแบบ

การออกแบบถนนตลอดเวลาที่ผ่านมาถูกออกแบบตามหลักวิศวกรรมศาสตร์เพื่อให้ พาหนะทุกชนิดสามารถสัญจรอยู่บนถนนได้อย่างปลอดภัยและสะดวกสบาย (Safe and comfort) โดยใช้วัสดุที่มีคุณภาพดีที่สุดและรับแรงกระทำจากการจราจรได้สูงที่สุด (ราคาแพง) อยู่ชั้นบน แล้วจึง เรียงลำดับชั้นตามคุณภาพของวัสดุลงมาจนถึงชั้นดินเดิมที่มีคุณภาพต่ำที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2-1



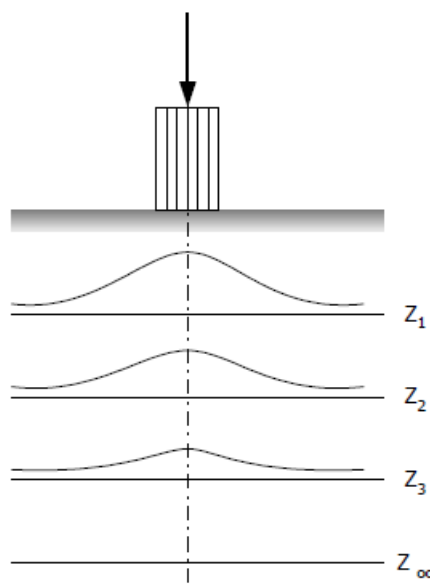
รูปที่ 2-1 รูปแบบโครงสร้างชั้นทางแบบหยุ่นตัว (Flexible Pavement)

โดยโครงสร้างชั้นทางแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ โครงสร้างชั้นทางแบบหยุ่นตัว (Flexible Pavement) และโครงสร้างชั้นทางแบบแกร่งตัว (Rigid Pavement) ลักษณะของโครงสร้างชั้นทางแบบหยุ่นตัว ได้แก่ ถนนลาดยาง ประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต หรือ เซอร์เฟสทรีตเมนต์ ชั้นพื้นทาง ชั้นรองพื้นทาง ชั้นวัสดุคัดเลือก และดินคั่นทาง ดังรูป 2-1 ส่วนลักษณะของโครงสร้างชั้นทางแบบแกร่งตัว ได้แก่ ถนนคอนกรีต ประกอบด้วย ผิวทางคอนกรีต ชั้นหินคลุกหรือทรายรองพื้นคอนกรีต ชั้นรองพื้นทางและดินคั่นทาง

2.1.1 โครงสร้างทางและแนวทางการออกแบบ

1) การออกแบบโครงสร้างชั้นทางผิวทางแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Flexible Pavement)

การออกแบบโครงสร้างถนนลาดยางโดยวิธี ของ Asphalt Institute ฉบับที่ 8 เป็นวิธีเชิงประสบการณ์ ซึ่งนำเอาข้อมูลจากผลการทดลองในถนนทดสอบ AASHTO Road Test, WASHO Road Test, British Road Test, และประสบการณ์จากงานจริง มาสร้างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ (Empirical Design) กับ ความหนาของชั้นพื้นทางที่ต้องการ โดยวัสดุในชั้นพื้นทางที่ได้ตามความสัมพันธ์จะเป็น Asphalt ทั้งหมด หรือที่เรียกว่า Full-Depth Asphalt Thickness (T_d) โดย การก่อสร้าง Full-Depth Asphalt pavement มีราคาค่อนข้างสูง และไม่สามารถเลือกใช้วัสดุท้องถิ่นได้เต็มที่ ดังนั้น Asphalt Institute จึงได้กำหนดค่าคงที่มาจำนวนหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า Substitution Ratio เพื่อใช้แปลงความหนาของวัสดุทดแทนอื่นให้เป็นความหนาของชั้น Asphalt ทำให้ผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้วัสดุอื่นที่ถูกลงกว่าทดแทนและสามารถกำหนดให้โครงสร้างถนนลาดยางให้มีลักษณะเป็นชั้นๆได้ จากการศึกษาพบว่าขนาดหน่วยแรงอัดในแนวตั้งที่เกิดในโครงสร้างชั้นทางจะมีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับความลึก ดังแสดงในรูปที่ 2-2 โดยหน่วยแรงอัดในแนวตั้งดังกล่าวจะมีความเข้มข้นสูงบริเวณที่ใกล้กับผิวจราจร และจะลดน้อยลงตามลำดับเมื่อระดับความลึกมากขึ้น ดังนั้นหากต้องการออกแบบโครงสร้างถนนลาดยางให้คุ้มค่าใช้จ่ายมักออกแบบใช้วัสดุที่มีคุณภาพดีที่สุดไว้ใกล้กับผิวจราจร และวัสดุที่มีคุณภาพรองลงมาให้ใช้ในส่วนลึกลงไป



รูปที่ 2-2 การแผ่กระจายของหน่วยแรงในแนวตั้งที่กระทำต่อโครงสร้างทางที่ความลึกต่างกัน

โดยองค์ประกอบข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบโครงสร้างถนนลาดยางตามวิธีของ Asphalt Institute ฉบับที่ 8 ประกอบด้วย ปริมาณการจราจร และความแข็งแรงของดินฐานราก ปริมาณการจราจรจัดให้อยู่ในรูปของ Design Traffic Number (DTN) และความแข็งแรงของดินฐานราก ให้อยู่ในรูปของค่า CBR, Plate Bearing k-value, หรือ ค่า R-value ค่าใดค่าหนึ่ง นอกจากนี้ อัตราส่วนความแข็งแรงของวัสดุต่างๆ ในโครงสร้างชั้นทาง (Substitution Ratios) ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ ที่ใช้ในการแปลงความหนาของ Full Depth Asphalt Pavement ให้เป็นถนนที่มีโครงสร้างทางเป็นชั้นๆ

ซึ่งจะเห็นได้ว่าการออกแบบที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้การวิเคราะห์เพียงค่าความแข็งแรงของดิน โครงสร้างถนนซึ่งในความเป็นจริงแล้วการพังทลายของผิวทางเกิดได้จากหลายสาเหตุเช่น ความชื้นชั้น โครงสร้างทาง ความแปรปรวนขณะการก่อสร้าง รวมไปถึงการรับกำลังดิ่ง ซึ่งยังไม่ถูกนำมาวิเคราะห์ ในการออกแบบปัจจุบัน ทางผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญในการออกแบบที่ครอบคลุมเรื่องความชื้นของ โครงสร้างชั้นทาง เพื่อยืดอายุการใช้งานของผิวทาง

2.1.2 การออกแบบชั้นพื้นทาง (Base course)

งานพื้นทางหินคลุก เป็นชั้นของวัสดุที่วางตัวอยู่ด้านล่างของผิวทางและ/หรืออยู่ด้านบนของชั้นรองพื้นทาง โดยระหว่างการก่อสร้างจะถูกเกลี่ยแต่งและบดทับให้ได้แนว ระดับ และรูปร่างตามที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน

1) การคัดเลือกวัสดุสำหรับชั้นพื้นทาง

วัสดุหินคลุกต้องเป็นหินไม่มวลรวม (Crushed Rock Soil Aggregate Type Base) ที่มีเนื้อแข็งเหนียว สะอาด ไม่ฝุ่น และปราศจากวัสดุอื่นเจือปน จากแหล่งที่ได้รับความเห็นชอบจากนายช่างผู้ควบคุมงาน วัสดุจำพวก Shale ห้ามนำมาใช้ (เนื่องจากแตกหักได้ง่าย มีความคงทนต่ำ และอาจมีสารอินทรีย์เจือปน) ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติไว้เป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้ทำชั้นพื้นทางหินคลุกจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ก. มีค่าความสึกหรอเมื่อทดสอบตาม ทล.-ท. 202 โดยเครื่อง Los Angles Abrasion ไม่เกินร้อยละ 40
- ข. มีค่าของส่วนที่ไม่คงทน (Loss) เมื่อทดสอบตาม ทล.-ท. 213 โดยใช้โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบ แล้วไม่เกินร้อยละ 9
- ค. ส่วนละเอียด (Fine Aggregate) ต้องเป็นวัสดุชนิดและคุณสมบัติเช่นเดียวกับกับส่วนหยาบ (Coarse Aggregate) หากมีความจำเป็นต้องใช้วัสดุส่วนละเอียดอื่นเจือปนเพื่อปรับปรุงคุณภาพ จะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวง
- ง. มีขนาดคละที่ดีเมื่อทดสอบตาม ทล.-ท. 205 ต้องมีขนาดหนึ่งขนาดใดตามตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2-1 การแยกคุณสมบัติขนาดคละของหินคลุก

ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวลรวม	
	A	B
50 (2 นิ้ว)	100	100
25.0 (1 นิ้ว)	-	75-95
9.5 (3/8 นิ้ว)	30-65	40-75
4.75 (เบอร์ 4)	25-55	30-60
2.00 (เบอร์ 10)	15-40	20-45
0.425 (เบอร์ 40)	8-20	15-30
0.075 (เบอร์ 200)	2-8	5-20

- จ. มวลละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร ต้องไม่มากกว่าสองในสามของละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.425 มิลลิเมตร
- ฉ. มีค่า Liquid Limit (LL) ไม่เกินร้อยละ 25 เมื่อทดสอบตาม ทล.-ท. 102
- ช. มีค่า Plasticity Index (PI) ไม่เกินร้อยละ 6 เมื่อทดสอบตาม ทล.-ท. 103
- ซ. มีค่า CBR เมื่อทดสอบตาม ทล.-ท. 109 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต และร้อยละ 90 สำหรับผิวทางแบบเซอร์เฟซทรีสเมนต์
- ณ. ความหนาแน่นร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน เมื่อทดสอบตาม ทล.-ท. 108

2.2 ผลกระทบของวัสดุชั้นทางที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อประสิทธิภาพของผิวทาง

การชำรุดเสียหายของผิวทาง เกิดจากสาเหตุหลายประการ เช่น อายุการใช้งานผิวทาง ปริมาณจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี (Annual Average Daily Traffic: AADT) ปริมาณรถบรรทุกหนัก (Heavy Truck Volume) ลักษณะภูมิอากาศ เช่น ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยต่อปีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวัน การเคลื่อนไหวของดินชั้นต่างๆ ที่อยู่ภายใต้ผิวทาง ตลอดจนลักษณะของโครงสร้างชั้นพื้นทางเดิมล้วนเป็นปัจจัยซึ่งส่งผลกระทบต่อลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นมีลักษณะแตกต่างกันออกไป

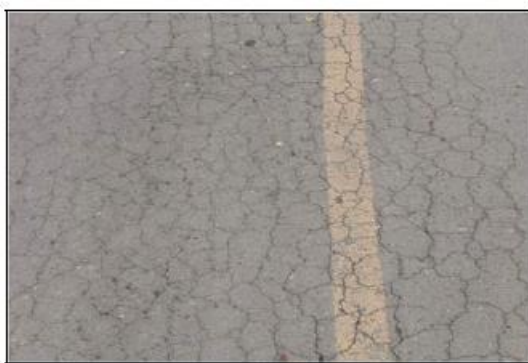
2.2.1 ประเภทความเสียหายของผิวทาง

ความเสียหายของผิวทางมักเกิดจากความเสียหายด้านโครงสร้างทาง (Structural Failure) และด้านการใช้งาน (Function Failure) เป็นต้น ซึ่งเป็นการก่อให้เกิด การล้าของผิวทางและการทรุดตัวในชั้นดินคันทางโดยจากการเก็บข้อมูลและงานศึกษาประเมินสภาพความเสียหายของผิวทางมักเกิดความ

เสียหายแบ่งได้เป็น 4 ประเภทความเสียหายคือ รอยแตก การเสียรูปร่างหรือการเปลี่ยนรูปร่าง รอยตำหนิบนผิวทาง ความเสียหายบริเวณรอยแตก ซึ่งปัญหาของการชำรุดของผิวทางที่เสื่อมสภาพจากชั้นโครงสร้างด้านความชื้นและความล้ามักจะทำให้เกิดปัญหาเช่นรอยแตกจระเข้บนผิวทางและการเสียรูปร่างเช่นเกิดร่องล้อ

1) การเกิดรอยแตกบนผิวทาง (crack)

รอยแตกจระเข้ (Alligator Crack) เกิดจากความล้าของวัสดุชั้นผิวทางแอสฟัลต์หรือชั้นพื้นทาง โดยน้ำหนักกระทำซ้ำของปริมาณการจราจร รอยแตกชนิดนี้จะเริ่มเกิดขึ้นที่ผิวล่างของชั้นผิวทางแอสฟัลต์หรือชั้นพื้นทาง ซึ่งมีความเครียดและความเค้นสูง ภายใต้การกระทำของน้ำหนักของล้อรถ



รูปที่ 2-3 รอยแตกหนังจระเข้

นอกจากนี้รอยแตกหนังจระเข้ มีสาเหตุมาจากการอ่อนตัวของผิวทางมากเกินไป เนื่องจากวัสดุโครงสร้างชั้นทางไม่ได้คุณภาพ กำลังรับน้ำหนักของวัสดุลดลง หรือในชั้นวัสดุใต้ผิวทางมีความชื้นสูงเกิดการอ่อนตัว หรือความหนาของโครงสร้างชั้นทางไม่เพียงพอ และมีน้ำหนักกระทำซ้ำมากเกินไป โครงสร้างชั้นทางนั้นจะรับได้



รูปที่ 2-4 สภาพโครงสร้างทางที่เกิดการสึกกร่อน

โดยผลการศึกษาของ (Li et al., 1999; Shutao et al., 2021) แสดงให้เห็นสภาพโครงสร้างระหว่างชั้นผิวทางและชั้นพื้นทางที่เกิดการสึกกร่อนทำให้เกิดช่องว่างระหว่างที่ผิวสัมผัสก่อให้เกิดความเครียดบริเวณด้านล่างของผิวทางแอสฟัลต์ซีเมนต์ซึ่งส่งผลให้เกิดรอยแตกจระเข้บริเวณผิวทาง นอกจากนี้ (De Beer 1985). ได้ทำการศึกษารณีเกี่ยวกับการสึกกร่อนของชั้นโครงสร้างทางโดยพบการสูญเสียของมวลละเอียดจากการชะล้างของวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุซึ่งเป็นสาเหตุการเกิดรอยแตกจระเข้

2) การเกิดร่องล้อ

ลักษณะของการเกิดร่องล้อ (Rutting) คือ การเปลี่ยนรูปของผิวทางโดยผิวทางมีการยุบตัวไปตามแนวร่องล้อแต่บริเวณด้านข้างไม่ถูกดันให้ปูดสูงขึ้น ความเสียหายนี้มีสาเหตุจากการบดอัดวัสดุชั้นทางในขณะที่ก่อสร้างไม่ดีพอหรือวัสดุทางมีส่วนผสมไม่เหมาะสม มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของโครงสร้างชั้นทางหรือการรับน้ำหนักเกินพิกัดของรถบรรทุกซึ่งสัญจรผ่านจึงทำให้เกิดการเคลื่อนตัวออกด้านข้างของวัสดุในชั้นต่างใดผิวทางหรือเกิดการเคลื่อนที่ของชั้นผิวทางเอง ดังรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 ความเสียหายประเภทร่องล้อ

การศึกษาในต่างประเทศพบว่า (Von Quintus et al., 2007) การปรับปรุงคุณภาพชั้นพื้นทางด้วยซีเมนต์ในวัสดุชั้นทางมีโอกาสเกิดร่องล้อน้อยกว่าเมื่อเทียบกับดินชั้นพื้นทางที่ไม่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ อย่างไรก็ตามชั้นพื้นทางที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์อาจส่งผลให้เกิดร่องล้อด้วยสาเหตุ 3 ปัจจัยคือ การเกิดความเค้นเฉือนในชั้นผิวทาง การสึกกร่อน หรือโครงสร้างชั้นพื้นทางเกิดการวิบัติในสาเหตุอื่น

Wen et al. (2014) ปัญหาด้านประสิทธิภาพของวัสดุโครงสร้างทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่เกี่ยวข้องกับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แก่ บล็อกการแตกร้าว, การแตกร้าวตามขวาง, การแตกจากความล้าจากบนลงล่างและจากล่างขึ้นบน, และร่องล้อ

ดังนั้นการศึกษาคูณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทางที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ควรคำนึงถึงคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับปัญหาด้านประสิทธิภาพ เช่น ความแข็งแรงความสามารถในการรับแรง (Strength), ความล้าของวัสดุ (Fatigue), การสึกกร่อนการกัดเซาะ (Erodibility) และความคงทนของวัสดุ (Durability)

2.3 การปรับปรุงคุณภาพวัสดุงานทางในปัจจุบัน

การปรับปรุงคุณภาพของวัสดุสำหรับงานทางนั้นปัจจุบันนี้มีหลายวิธี (Kolay & Dhakal, 2020) ซึ่งในประเทศไทยเองนั้นมีการนำดินผสมซีเมนต์ (Soil Cement) มาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินแต่ก็ยังมีคงปัญหาบางประการ อาทิเช่น วัสดุมีคุณสมบัติความแข็งแรงที่เพิ่มมากขึ้นขาดความยืดหยุ่น ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวของชั้นทาง (Nusit & Jitsangiam, 2016) นอกจากนี้ในต่างประเทศยังมีการนำพอลิเมอร์มาใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินสำหรับงานทาง ((Baghini et al., 2016; Georgees et al., 2015; Hie et al., 2020; Kavak et al., 2010; Kolay & Dhakal, 2020;

Shojaei Baghini et al., 2014; Taher et al., 2020; Zhu et al., 2019) แต่การศึกษาในอดีตมักใช้พอลิเมอร์ที่มีสูตรสำเร็จและได้รับคำแนะนำการใช้งานโดยผู้ผลิต อีกทั้งองค์ประกอบของพอลิเมอร์ในการศึกษาในอดีตมักจะไม่ได้รับการเปิดเผย ทำให้มีความสับสนในการนำผลของการศึกษาไปใช้งานอย่างมาก

2.3.1 การปรับปรุงคุณภาพชั้นทางด้วยซีเมนต์

การปรับปรุงคุณภาพชั้นทางด้วยหินคลุกผสมซีเมนต์ในปัจจุบันเป็นที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างถนนที่มีปริมาณการจราจรสูงซึ่งนิยมทั้งในและต่างประเทศเนื่องจากชั้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์มีความแข็งแรงมากกว่าชั้นพื้นทางหินคลุก



รูปที่ 2-6 การก่อสร้างชั้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์

การใช้ปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของหินคลุกใช้ในการก่อสร้างถนน เป็นการปรับปรุงชั้นทางหินคลุกให้เป็นชั้นทางที่มีคุณภาพสูงขึ้นเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพซึ่งนิยมเป็นวัสดุงานทางในประเทศไทยทั้งถนนสายหลักและสายรองโดยชั้นพื้นทางหินคลุกเป็นวัสดุประเภทไม่มีวัสดุเชื่อมแน่น (Unbound Material) เมื่อได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างที่มีวัสดุเชื่อมแน่น (Bound Material) พันธะเชื่อมประสาน (Cementation bond) ซึ่งทำให้หินคลุกมีความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนสูงขึ้นมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นการรับกำลังที่เพิ่มขึ้นและยังทำให้ผิวทางที่อยู่เหนือชั้นหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มมากขึ้นและมีอายุการใช้งานที่ยาวขึ้นส่งผลให้ประหยัดงบประมาณในการบำรุงถนน

Carret et al. (2021) ทำการศึกษาผลกระทบของการแตกร้าวของวัสดุต่อคุณสมบัติวัสดุที่ทำการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ โดยการศึกษาที่ใช้ซีเมนต์ 4% โดยมวล โดยจะมีวัสดุครึ่งหนึ่งถูกทำให้แตกร้าวโดยค้อนและทำการทดสอบวัดโมดูลัสแบบไดนามิกทั้งวัสดุที่ทำให้แตกร้าวและยังไม่แตกโดยผลการทดสอบพบว่า ค่าโมดูลัส ค่าแรงดึงทางอ้อม และแรงอัดของชั้นงานที่ทำให้แตกร้าวสูงกว่าชั้นงานที่ไม่ทำให้แตกร้าว

Chitinchee (2016) ทำการศึกษาการทดสอบหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนของวัสดุชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์และวัสดุงานทางดินซีเมนต์ด้วยวิธี Free-Free Resonance (FFR) ด้วยอัตราส่วนผสมซีเมนต์ 1%, 3% และ 5% ตามน้ำหนัก โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่วัดได้และค่ากำลังอัดแกนเดียวพบว่าค่าความเร็วคลื่นเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนซีเมนต์เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

สำหรับการออกแบบชั้นพื้นทางผสมหินคลุกตามมาตรฐานกรมทางหลวงในการหาปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับมาผสมกับหินคลุกและนำไปถือเอาค่ากำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ได้จากการทดสอบที่ ทล.-105/2515 “วิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน” ซึ่งตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์จะถูกบดอัดโดยวิธี Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน แล้วทำการบมภายในถุงพลาสติก เพื่อให้มีความชื้นเปลี่ยนแปลงเป็นเวลา 7 วัน แล้วนำไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง ผลการทดสอบการรับกำลังอัดแกนเดียวต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 24.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ปริมาณน้ำในดินที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างหินคลุกซีเมนต์ เพื่อการทดสอบหาลำลังอัดแกนเดียวตามวิธีการทดสอบให้ใช้ปริมาณน้ำในหินคลุกที่ Optimum Moisture Content ซึ่งได้จากการทดลองการบดอัดหินคลุกตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.108/2517 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน”

2.3.2 การปรับปรุงคุณภาพชั้นทางด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์

คุณสมบัติของวัสดุหินคลุกผสมซีเมนต์ด้วยซีเมนต์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติความแข็งแรงสูง แต่ขาดความยืดหยุ่นซึ่งส่งผลให้เกิดรอยแตกของชั้นทางการผสมพอลิเมอร์เพิ่มไปในวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์นอกจากจะเพิ่มคุณสมบัติความแข็งแรงยังสามารถเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับโครงสร้างชั้นทางอีกด้วยรวมไปถึงหลายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์ช่วยในด้านความคงทนของวัสดุโครงสร้างทางแต่การเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์ในปริมาณที่มากเกินไปอาจส่งผลเสียคุณสมบัติด้านการรับกำลังพอลิเมอร์งานวิจัยนี้จึงนำพอลิเมอร์มาเป็นสารผสมเพิ่มในวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของวัสดุในระยะยาว

Hardkaeo Iradaporn. et al. (2021) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของมวลรวมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ โดยนำหินคลุกและวัสดุผิวทางเก่า มาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิดสไตรีนอะคริลิก (SA) และพอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) จากนั้นทำการทดสอบด้านกำลังของตัวอย่างที่อายุการบ่ม 7 วัน และการทดสอบด้านทานความชื้นพบว่าการรับกำลังแกนเดียวลดลงเมื่อวัสดุทั้งสองถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ในทางกลับกัน ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ ในส่วนการทดสอบการต้านทานความชื้นพบว่า วัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์มี

ค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่าวัสดุที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์และมีค่าความทนทานการสูญเสียของน้ำหนักต่ำลงเช่นกัน

Hardkao Iradaporn. and Nusit Korakod. (2020) ทำการศึกษาปรับปรุงดินซีเมนต์ผสมยางพาราและดินซีเมนต์ผสมพอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก (SA) ในอัตราส่วนน้ำต่อพอลิเมอร์ร้อยละ 50 ผลการทดสอบพบว่าดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์มีค่ากำลังรับแรงอัดที่มากกว่าดินซีเมนต์ปกติและดินซีเมนต์ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดินที่สูงกว่าดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์

saleewong (2020) ทำการออกแบบหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างซีเมนต์-พอลิเมอร์ก่อนนำมาปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยทำการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมซีเมนต์ต่อพอลิเมอร์ที่ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 พบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมซีเมนต์ต่อพอลิเมอร์ที่ 90:10 มีค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดึงสูงสุดจากนั้นทำการทดสอบการดูดซึมน้ำพบว่าวัสดุซีเมนต์พอลิเมอร์มีคุณสมบัติในการช่วยป้องกันความชื้นได้

Nusit & Jitsangiam (2020) ชี้ให้เห็นว่าพอลิเมอร์ชนิด Styrene Acrylic และ Styrene Butadiene Rubber สามารถใช้เพิ่มกำลังรับน้ำหนักและประสิทธิภาพเบื้องต้นของวัสดุงานทางได้อย่างดี อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการรับแรงและพฤติกรรมในระยะยาวของวัสดุงานทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยพอลิเมอร์มีความสำคัญมากแต่มีผู้ที่ศึกษาเรื่องดังกล่าวอย่างจริงจังจึงมีไม่มากนัก (Wen et al., 2014) ทั้งนี้ ประสิทธิภาพในระยะยาวของวัสดุงานทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์จะใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความคุ้มค่าในการใช้สารผสมเพิ่มที่มีราคาแพงมาปรับปรุงคุณภาพวัสดุงานทาง

Wen et al. (2014) กล่าวว่า การทดสอบประสิทธิภาพในระยะยาวของวัสดุงานทางที่ปรับปรุงคุณภาพนั้น ยังไม่มีความชัดเจน เนื่องจากการทดสอบดังกล่าวมักใช้เวลาและงบประมาณสูง นอกจากนี้ การศึกษาในอดีตส่วนใหญ่มักเป็นการศึกษาที่คิดค้นและจัดทำขึ้นในต่างประเทศ

Ahmad et al. (2013) ทำการศึกษาคุณสมบัติของ ดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสไตรีนบิวตาไดอิน ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ร้อยละ 0 2.5 5 7.5 10 และ 12.5 ตามลำดับ มาผสมกับดินประเภท Heavy soil (HM) และทำการบ่มเป็นเวลา 1 3 7 และ 14 วัน โดยได้ผลทดสอบว่า ค่า Maximum dry density (MDD) ลดลง เมื่อมีปริมาณพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture content, OMC) เพิ่มขึ้นตามปริมาณของพอลิเมอร์ผลการทดสอบแรงเฉือน (Direct Shear) มีค่าสูงสุดเมื่อมีปริมาณพอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอินร้อยละ 2.5 และค่าการทดสอบค่าความซึมน้ำ (Permeability) เมื่อปริมาณพอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอินเพิ่มขึ้นความพรุนภายในตัวอย่างจะน้อยลง

2.4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

2.4.1 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

ตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ (Cement Modified Crushed Rock Base) ตามมาตรฐานงานทางที่ ทล.-ม. 203/2556 ได้กำหนดคุณสมบัติเพื่อเป็นเกณฑ์ในการออกแบบโดยต้องทำการทดสอบดังนี้

1) ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain Size Distribution)

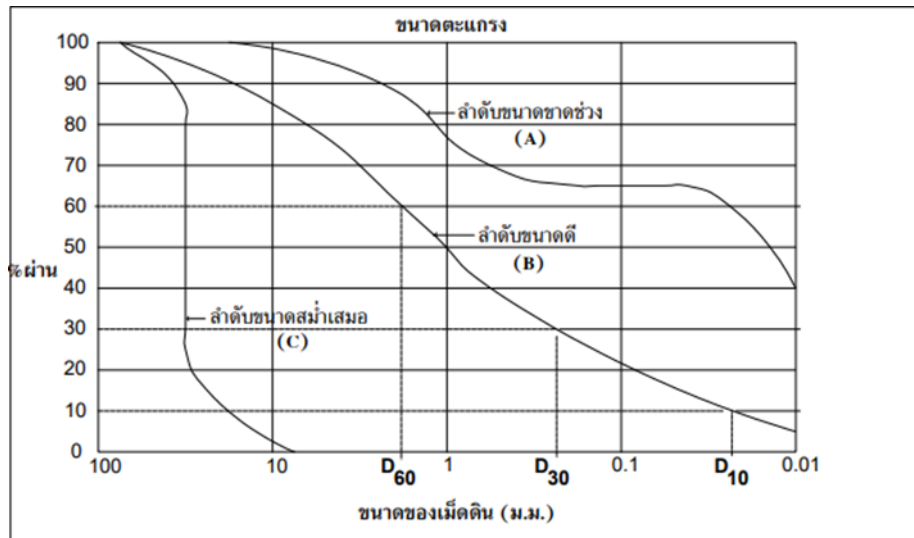
การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดิน (Grain Size Analysis) เป็นการทดลองเพื่อหาว่าในมวลดินมีเม็ดดินแต่ละขนาดอย่างละเท่าใด และเม็ดดินมีการกระจายขนาดหรือลำดับขนาดเป็นอย่างไร การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินทำได้ 2 วิธี คือ

1.1 วิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) เป็นการทดลองเพื่อหาว่ามีกรวด (Gravel) หยาบ (Sand) และ เม็ดละเอียด (Fine) ร้อยละเท่าไรโดยน้ำหนัก และเม็ดดินมีการจัดลำดับขนาดอย่างไร การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง เป็นการหาการกระจายขนาดจากกราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเม็ดดิน (ขนาดตะแกรง) และร้อยละที่ผ่านตะแกรงของน้ำหนักดิน การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงทำได้ 2 แบบ คือ

ก. การทดลองแบบไม่ล้างน้ำ หรือ แบบแห้ง (Dry Process) ใช้กับดินพวกที่ไม่มี Cohesive หรือถ้ามีก็มีในปริมาณน้อย มวลดินไม่จับกันเป็นก้อน

ข. การทดลองแบบล้างน้ำ (Pre-Washed Process) ใช้กับดินพวกที่มี Cohesive มวลดินจะจับกันเป็นก้อนยากแก่การทำให้แยกจากกันจึงใช้วิธีล้างส่วนที่เป็นเม็ดละเอียดให้ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ทิ้งไป แล้วนำดินส่วนที่เหลือมาทดลอง

1.2 วิธีตกตะกอน (Hydrometer Analysis) เป็นการทดลองเพื่อหาว่ามี ดินตะกอน (Silt) และ ดินเหนียว (Clay) ร้อยละเท่าไรโดยน้ำหนัก



รูปที่ 2-7 กราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน

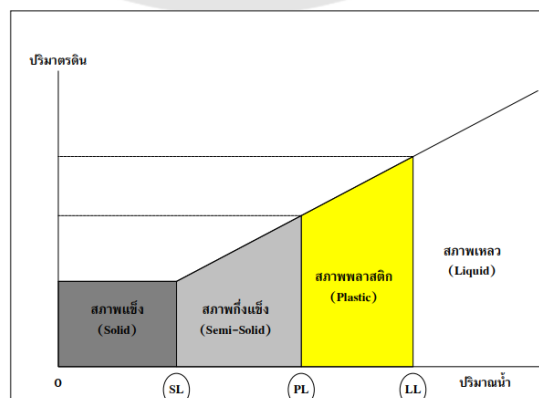
ดินที่มีขนาดคละกันดี (Well Graded Soil) หมายถึง มวลดินที่มีเม็ดดินขนาดต่าง ๆ คละกัน
อย่างเหมาะสม ตั้งแต่ขนาดใหญ่ไปจนถึงขนาดเล็กเส้นกราฟจะแผ่กว้างอย่างราบเรียบสม่ำเสมอ
ดินมีขนาดคละกันไม่ดี (Poorly Graded Soil) ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภท

1. ลำดับขนาดสม่ำเสมอ (Uniform Graded) หมายถึง มวลดินที่มีขนาดเม็ดดินขนาด
เดียวกันเส้นกราฟจะมีลักษณะเกือบเป็นเส้นแนวตั้ง

2. ลำดับขนาดขาดช่วง (Gap Graded) หมายถึง มวลดินที่มีแต่เม็ดดินขนาดใหญ่และขนาด
เล็กขนาดปานกลางหายไปเส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นในแนวราบในช่วงที่เม็ดดินขาดหายไป

2) Atterberg Limit ซึ่งประกอบด้วย Liquid Limit และ Plastic Limit

ขีดจำกัดของแอตเตอร์เบอร์ก (Atterberg's Limit) หมายถึง ปริมาณน้ำ ณ จุดที่มวลดิน
โดยเฉพาะ มวลดินเหนียว (Clay) เปลี่ยนจากสภาพหนึ่งไปเป็นอีกสภาพหนึ่งเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า
ขีดจำกัดของความชื้นเหลวของดิน (Consistency Limit)



รูปที่ 2-8 กราฟความชื้นเหลวของมวลดิน (Consistency Limit Graph)

LL = ชีดเหลว (Liquid Limit)

PL = ชีดพลาสติก (Plastic Limit)

SL = ชีดหดตัว (Shrinkage Limit)

PI = Plasticity Index = LL - PL (จะเป็นตัวบอกปริมาณดินเหนียว)

PI มาก จะมีดินเหนียวมาก PI น้อย จะมีดินเหนียวน้อย

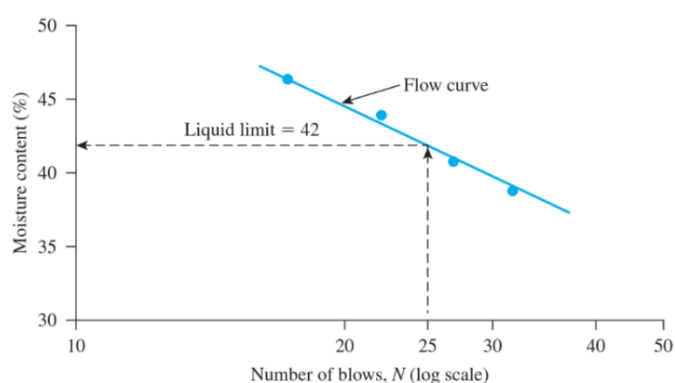
1. การหาค่าชีดเหลว: LL (Liquid Limit) คือปริมาณน้ำที่มีอยู่พอดีในมวลดินที่ทำให้มวลดินเริ่มเปลี่ยนสภาพจากสภาพเหลว (Liquid) ไปเป็นสภาพพลาสติก (Plastic) คิดเทียบเป็นร้อยละ (%) ของมวลดินอบแห้ง Liquid Limit (LL) อ่านได้จากกราฟ ที่การเคาะ 25 ครั้งคำนวณหาปริมาณน้ำในดินได้จากสมการ 2-1

$$W = \frac{\text{มวลของน้ำในดิน (กรัม)}}{\text{มวลของดินอบแห้ง}} \times 100 \quad (2-1)$$

เมื่อ $W =$ ปริมาณน้ำในดิน มีหน่วยเป็นร้อยละ

2. การหาค่าชีดพลาสติก: PL (Plastic Limit) คือ ปริมาณน้ำที่มีอยู่พอดีในมวลดินที่ทำให้มวลดินเริ่มเปลี่ยนสภาพ จากสภาพพลาสติก (Plastic) ไปเป็นสภาพกึ่งแข็ง (Semi-Solid) คิดเทียบเป็นร้อยละ (%) ของมวลดินอบแห้ง คำนวณปริมาณน้ำในดินดังสมการ 2-2

$$PL = \frac{\text{มวลของน้ำในดิน (กรัม)}}{\text{มวลของดินอบแห้ง}} \times 100 \quad (2-2)$$



รูปที่ 2-9 กราฟการหา Liquid Limit (LL) อ่านได้จากกราฟ ที่การเคาะ 25 ครั้ง

3) ความคงทนต่อการสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion (LAA)

การทดสอบหาค่าการสึกหรอของวัสดุมวลรวมหยาบ โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion (LAA) วิธีนี้เป็นที่ยอมรับกันในการทดสอบความแข็งของมวลรวม การทดสอบทำโดยการเตรียมมวลรวมและนำไปใส่ในภาชนะทรงกระบอก (drum) ที่บรรจุลูกเหล็กทรงกลมแล้วหมุนภาชนะทรงกระบอกนี้ ก็จะสามารถหาค่าการสูญเสียของมวลรวมหรือปริมาณที่ถูกบดย่อยได้ตั้งสมการที่ 2-2 ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นการเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักวัสดุที่ใช้ทดสอบทั้งหมดกับน้ำหนักของวัสดุที่สูญเสียไป เนื่องจากการถูกขัดสีระหว่างวัสดุและลูกเหล็กการถูกบดทับด้วยลูกเหล็กทรงกลมตามจำนวนที่กำหนด การถูกกระแทกทำลายด้วยการตกจากด้านหนึ่งลงมากระแทกอีกด้านหนึ่งของเครื่องทดสอบทรงกระบอกเหล็กที่หมุนด้วยความเร็ว 30-33 รอบต่อนาที ตามจำนวนรอบที่กำหนด

$$\text{เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย} = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (2-2)$$

เมื่อ

A = น้ำหนักตัวอย่างทั้งหมดก่อนการทดสอบ กรัม

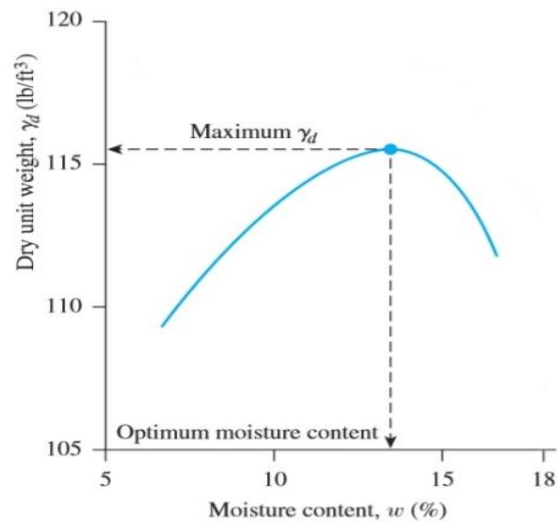
B = น้ำหนักตัวอย่างภายหลังการทดสอบที่มีขนาดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 12

4) ความคงทนต่อการกัดกร่อนของมวลรวม (Soundness)

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความต้านทานการสลายตัวของมวลรวมในสารละลายโซเดียมซัลเฟตหรือแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นจากเกลือของสารละลายในช่องว่างมวลรวม จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับความเสียหายของมวลรวมที่จุดเยือกแข็ง

5) ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ที่ใช้สำหรับการบดอัดดิน

การบดอัดดิน เป็นวิธีการที่จะทำให้เม็ดดินจับตัวกันแน่นมากขึ้น โดยใช้กำลังทางกลเข้าช่วยทำให้ความหนาแน่นแห้ง (Dry density) เพิ่มขึ้น หรือทำให้ฟองอากาศในดินลดลง ที่ความชื้นต่ำ ๆ เม็ดดินจะถูกล้อมรอบด้วยฟิล์มของน้ำซึ่งจะทำให้เม็ดดินไม่จับตัวเท่าที่ควรขณะที่บดอัด เมื่อความชื้นมากขึ้นจะทำให้บดอัดได้ดีขึ้น แต่จะถึงจุด ๆ หนึ่งที่มีความชื้นพอเหมาะที่ทำให้มีค่าความหนาแน่นแห้งมากที่สุด (Optimum moisture content) เมื่อเลยจุดนี้ไปแล้วปริมาณน้ำที่มากเกินไป จะทำให้เม็ดดินไม่เปียกชื้นเท่าที่ควรทำให้ Dry density ลดลง



รูปที่ 2-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นและ Dry density

การคำนวณ

ก. คำนวณหาปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ

$$W = \frac{(M_1 - M_2)}{M_2} \times 100 \quad (2-3)$$

เมื่อ W = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละคิดเทียบกับมวลของดินอบแห้ง

M_1 = มวลของดินเปียก (g)

M_2 = มวลของดินอบแห้ง (g)

ข. คำนวณหาค่าความแน่นเปียก (Wet Density)

$$\rho_t = \frac{A}{V} \quad (2-4)$$

เมื่อ ρ_t = ความแน่นเปียก (g/mm^3)

A = มวลของดินเปียกที่บดทับในแบบ (g)

V = ปริมาตรของดินเปียกที่บดทับในแบบมี (mm^3)

ค. คำนวณหาค่าความแน่นแห้ง (Dry Density)

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{W}{100}} \quad (2-5)$$

เมื่อ ρ_d = ความแน่นแห้ง (g/mm^3)

ρ_t = ความแน่นเปียก (g/mm^3)

W = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ

2.4.2 การจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทาง

การศึกษาอิทธิพลของสภาวะต่างๆที่มีต่อกำลังอัดซึ่งเป็นคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่สำคัญในการออกแบบความคงทนของวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ Wetting and Drying Test การทดสอบแบบเปียกสลับแห้ง, Freezing and Thawing Test การทดสอบการแช่แข็งและการละลาย, Moisture Susceptibility Test การทดสอบความไวต่อความชื้น และ Erodibility Tests การทดสอบการกัดเซาะ เป็นต้น

1) Wetting and Drying Test

เป็นการทดสอบแบบเปียกสลับแห้ง โดยทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D599 การทดสอบนี้คือขั้นตอนในการพิจารณาการสูญเสียดินซีเมนต์ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำและการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (การบวมและการหดตัว) ที่เกิดจากการทำให้เปียกและแห้งของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่แข็งตัวเข้าไปมา ตัวอย่างจะถูกบดอัดในแม่พิมพ์ก่อนการให้น้ำดินซีเมนต์เพื่อให้ความหนาแน่นสูงสุดที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสมซึ่งเปรียบเสมือนโครงสร้างชั้นพื้นทางที่ผ่านสภาพอากาศร้อนและฝนสลับกันจนอาจก่อให้เกิดความเสียหายบนชั้นผิวทาง โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบ Wetting and Drying ก่อนจะนำไปทดสอบคุณสมบัติด้านการรับกำลังของวัสดุ

งานวิจัยในต่างประเทศการทดสอบ Wetting and Drying พบว่ามีผลต่อการรับกำลังและค่าโมดูลัสของวัสดุ โดยปกติค่าโมดูลัสและการรับกำลังจะลดลงเมื่อจำนวนรอบการทดสอบเพิ่มขึ้น (Khoury & Zaman, 2007; Paige-Green, 1998; Scullion et al., 2021; Xie & Ling, 2008; Zaman et al., 1999) การศึกษาของ (Zaman et al., 1999) พบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นถึงค่าต่ำสุดประมาณ 60% ของค่าโมดูลัสเดิมหลังจากการทำให้การทดสอบ Wetting and Drying ที่ 8 รอบ และ ค่าการรับกำลังอัดแกนเดียลดลง 60% เดิมหลังจากทดสอบ 4 รอบ

จากข้อมูลดังกล่าวการทดสอบ Wetting and Drying มีผลต่อประสิทธิภาพในการรับกำลังของวัสดุและควรพิจารณาร่วมตอนออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทาง

2) Freezing and Thawing Test

การทดสอบการแช่แข็งและการละลาย เป็นการทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D560 การทดสอบนี้คือขั้นตอนในการพิจารณาการสูญเสียดินซีเมนต์ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำและการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (การบวมและการหดตัว) ที่

เกิดจากการแช่แข็งและการละลายตัวอย่างดินซีเมนต์ที่แข็งตัวเข้าไปมา ตัวอย่างจะถูกบดอัดในแม่พิมพ์ก่อนการให้น้ำดินซีเมนต์เพื่อให้มีความหนาแน่นสูงสุดที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสมซึ่งเป็นที่นิยมในต่างประเทศเนื่องด้วยสภาพอากาศของต่างประเทศมีอุณหภูมิที่ต่ำ

ตารางที่ 2-2 การประเมินการทดสอบความทนทานวัสดุงานทางผสมซีเมนต์ (Wen et al., 2014)

	Wetting and Drying	Freezing and Thawing	Tube Suction	Vacuum Saturation
Performance Predictability	Good (simulates field conditions)	Good (simulates field conditions)	Average (strong correlation with brush test (Syed and Scullion 2001) and links to field performance of durability (Scullion et al. 2005))	Good (correlation with residual strength and moisture content after vacuum and 5 F-Z cycles)
Precision	Poor (brushing test has problems of poor repeatability and reproducibility (Scullion et al. 2005), due to the susceptibility of brushing technique to operator variability and loss of single large aggregate particles (Ventura 2003))	Poor (not repeatable) (Ventura 2003)	Average (repeatable at high DV, but not repeatable below DV of 10; the number of replicates required depends upon the selection of reliability and tolerance, as well as specified maximum dielectric values) (Guthrie et al. 2001)	Average (16.8% COV) (Guthrie et al. 2008)
Accuracy	Good (direct measurement; evaluates durability based on weight loss, which is overly severe)	Good (direct measurement; mass loss only may cause misleading assessment of the results)	Average (correlates well with W-D and F-Z results; the maximum dielectric value criterion, less than 10 for good base materials, seems to be more conservative than the soil-cement loss criterion specified in W-D durability tests; can be used as screening tool for mix design) (Guthrie et al. 2001)	Good (significant correlation between vacuum saturation strength and cyclic freeze-thaw strength.) (Dempsey and Thompson 1973)
Practicality	Poor (length – 1 month)	Poor (length –1 month)	Good (easy to perform and nondestructive)	Good (rapid and economical method) (Guthrie et al. 2008)
Machine Costs	Low	Low	Very low	Very low
Time	Long (approximately 1 month)	Long (approximately 1 month)	Long (10 to 14 days)	Short (a few hours)
Recommendation	Recommended for model development and Level 1	Recommended for model development and Level 1	Not recommended because it only provides an index and cannot be used for modeling	Recommended for Level 2

Note: Cost Ratings: High: >\$50,000; Medium: \$20,000 to \$50,000; Low: <\$20,000; Very Low: <\$5,000

2.4.3 การทดสอบคุณสมบัติด้านการรับกำลังของวัสดุ

การทดสอบคุณสมบัติด้านการรับกำลังของวัสดุเป็นส่วนหนึ่งในการศึกษาความสามารถในการรับกำลังของวัสดุซึ่งทำการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการเพื่อนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์และออกแบบโดยการทดสอบในงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วย การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม การทดสอบ Seismic Modulus Test และ การทดสอบ Fatigue Strength Test เป็นต้น

1) การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นในการจำลองความสามารถรับกำลังอัดของวัสดุโดยการบีบอัดจากบนลงล่างซึ่งการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวยังสัมพันธ์กับความแข็งแรงและโมดูลัสอื่น ๆ อีกด้วย ซึ่งงานทางหลวงของหลายประเทศไทยได้ใช้ผลการทดสอบการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวเพื่อพิจารณาการออกแบบส่วนผสมและควบคุมคุณภาพของโครงสร้างชั้นทาง ชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางเนื่องจากการทดสอบสามารถทำได้ไม่ยากนัก

โดย (Yeo R., 2002) ใช้การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวในการออกแบบส่วนผสมของการปรับปรุงดินซีเมนต์

สำหรับการทดสอบหินคลุกผสมซีเมนต์ขนาดของตัวอย่างจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว หรือ 2.8 นิ้ว สูง 5.6 นิ้ว ตามมาตรฐาน ASTM D1633 สำหรับตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว ใช้ค่าการแก้ไข 0.909 เพื่อแปลงความแข็งแรงให้เป็น

ชั้นงานที่มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 การเตรียมตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์ขึ้นอยู่กั ASTM D1632 จำเป็นต้องมีการกำหนดสูงสุดสำหรับตัวอย่างดินซีเมนต์ การทดสอบดำเนินการโดยใช้ displacement-controlled, 0.05 นิ้ว / นาทีหรือควบคุมความเครียด 20 psi ต่อวินาที โดยก่อนการทดสอบตัวอย่างคือต้องทำการแช่น้ำอย่างน้อย 2 ชั่วโมง

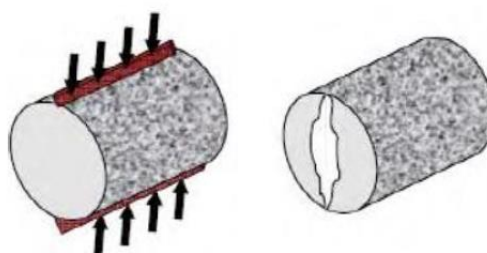
การคำนวณหาค่าการรับกำลังแกนเดียว

$$UCS = \frac{Pd}{Ah} \quad (2-6)$$

เมื่อ P = แรงแกด
 A = พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยที่แรงแกด
 d = ระยะยู่ตัวของตัวอย่างหลังการทดสอบ
 h = ความสูงตัวอย่างก่อนทดสอบ

2) การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength)

การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม คือ การทดสอบความสามารถในการรับแรงดึงของตัวอย่างโดยการให้แรงกระทำในแนวตั้งโดยขนาดกัเส้นผ่านศูนย์กลางตัวอย่างโดยแรงจะกระจายทั่วตัวอย่าง ทำให้เกิดการขยายตัวในแนวราบและเกิดการวิบัติตามลำดับ แสดงดังรูป 2-7 โดยการทดสอบกำลังดึงทางอ้อมเป็นการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM D6931-17 “Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures” ซึ่งในหลายงานวิจัยที่ผ่านได้นำมาวิธีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับการปรับปรุงคุณภาพดินผสมซีเมนต์ (Wen et al., 2014; Yeo R., 2002)



(ก) แรงแัดกระทำบนก้อนตัวอย่าง (ข) ก้อนตัวอย่างเกิดการเสียหาย

รูปที่ 2-11 การให้แรงกระทำตัวอย่างและการแตกร้าวของตัวอย่าง

(ที่มา: สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนากรมทงหลวงชนบท
และคณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

การคำนวณหาค่าการรับกำลังดึงทางอ้อม

$$S_t = \frac{2P}{\pi t D} \quad (2-7)$$

เมื่อ

St = IDT strength
P = แรงกดสูงสุด
t = ความสูงของตัวอย่าง
D = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง

งานศึกษาที่ผ่านมา (Yeo R., 2002) กล่าวว่า การทดสอบการรับแรงดึงทางอ้อมสามารถทดสอบได้จริง ให้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือ และเป็นการทดสอบที่ประหยัดค่าใช้จ่าย และ การทดสอบ IDT สามารถใช้ในการวัดได้โมดูลัสอัตราส่วนของปัวของความล้าและการเปลี่ยนรูปถาวร (Gnanendran & Jegatheesan, 2008)

3) การทดสอบ Fatigue Strength Test

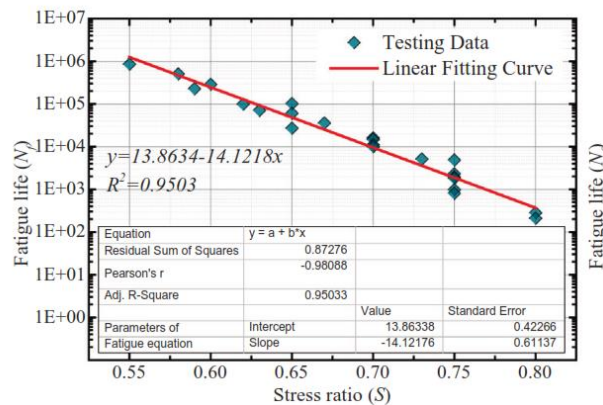
การทดสอบนี้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับหาค่าความต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue) ของคอนกรีตตัวอย่างแอสฟลตคอนกรีต (ตามมาตรฐาน EN 12697-24) แล้วนำมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบการปรับปรุงโครงสร้างชั้นทาง โดยใช้ชุดการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบ Indirect Tensile Strength เมื่อกอนตัวอย่างได้รับแรงกระทำซ้ำระหว่างการทดสอบจนเกิดการแตกร้าวจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำจะเป็นตัวแทนของค่า Fatigue Life (N) ของคอนกรีตตัวอย่าง

การทดสอบความล้า (Fatigue) สามารถทดสอบได้โดย วิธี flexural beam fatigue, IDT fatigue และ large-scale model โดยในการศึกษานี้ได้ใช้วิธีการทดสอบแบบ IDT Fatigue test โดยทดสอบผ่านเครื่องทดสอบ UTM

การทดสอบ IDT Fatigue test โดยตัวอย่างมีขนาดเท่ากับก้อนตัวอย่างแอสฟลตคอนกรีต หรือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูงประมาณ 3 นิ้ว ผ่านเครื่อง UTM โดยเครื่องทดสอบจะให้แรงกระทำซ้ำๆรูปแบบไดนามิก โดยใช้ความถี่ 10 Hz. ซึ่งเป็นการจำลองผลกระทบของรถที่สัญจรบนท้องถนน

การควบคุมสำหรับการให้แรงกระทำซ้ำการทดสอบนี้สามารถควบคุมได้สองวิธีคือ ควบคุมความเครียด (strain controlled mode) หรือ ควบคุมความเค้น (stress controlled mode) โดยในการศึกษานี้เลือกการควบคุมความเค้น เนื่องด้วยวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์มีความแข็งแรงสูง และการออกแบบโครงสร้างทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ ค่าความเค้นถือเป็นตัวควบคุมตัวชี้วัด

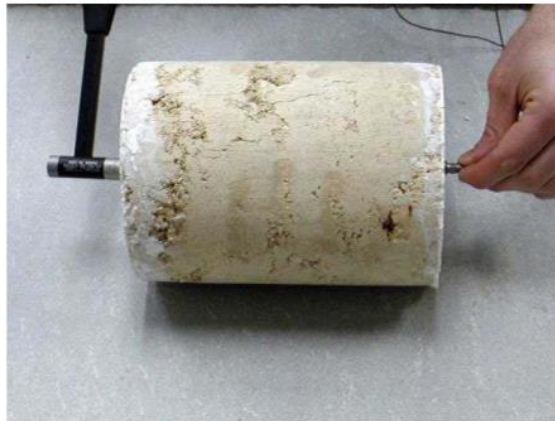
การกำหนดอัตราส่วนความเค้น (Stress Ratio) หรือการใส่แรงที่กระทำต่อวัสดุ โดยจากคำแนะนำ (JTG E-51-2009) กล่าวว่า ควรอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.85 ของค่า IDT โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ 0.70 IDT เพื่อเป็นการทดสอบหา Fatigue Life (N) ของคอนกรีตตัวอย่าง



รูปที่ 2-12 ตัวอย่างเส้นความสัมพันธ์ระหว่าง stress amplitude และ fatigue life ของตัวอย่างโครงสร้างชั้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (Dong et al., 2021)

4) การทดสอบ Seismic Modulus Test (Free-Free Resonance: FFR)

การทดสอบ Seismic Modulus Test หรือ การทดสอบการคลื่นสั้นสะเทือนภายใต้มาตรฐาน ASTM C215 หรือ Texas DOT free-free resonant column (FFRC) test, Tex - 147-E. คือการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายตัวอย่าง ใช้เวลาทดสอบไม่นาน และมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำ การทดสอบด้วยวิธีการนี้เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายเพื่อหาค่าโมดูลัสของวัสดุที่ความเครียดต่ำ (Low Strain Modulus) โดยวิธีการทดสอบ Free-Free Resonance ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อทดสอบวัสดุพอร์ตแลนด์ซีเมนต์เท่านั้นซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำวิธีการทดสอบนี้มาประยุกต์ใช้กับการประเมินคุณสมบัติของวัสดุประเภทอื่น เช่น วัสดุโครงสร้างชั้นทางผสมซีเมนต์ รวมไปถึงเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นต้น ทั้งนี้การทดสอบ Free-Free Resonance สามารถนำมาศึกษาคุณสมบัติด้านพลศาสตร์ของวัสดุดินผสมซีเมนต์ได้เช่นกันซึ่งได้รับการตรวจสอบและพิสูจน์ให้เห็นจากหลายงานวิจัยว่าเป็นวิธีการทดสอบที่น่าเชื่อถือ (Guimond-Barrett et al., 2013; Ryden et al., 2006)



รูปที่ 2-13 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ Free-Free Resonance (Guthrie et al., 2002)

ซึ่งการทดสอบ Free-Free Resonance คือการหาค่าความถี่พ้อง (Resonant Frequency) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่างเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเร็วคลื่นของวัสดุ ความถี่แบบสั้นพ้องสามารถหาได้ 3 ชนิดคือ Transverse และ Torsional ใช้ในการคำนวณหา S-wave และ Longitudinal ใช้สำหรับการหา P-wave ดังสมการ 2-8 และ 2-9 ตามลำดับ โดยการหาค่าความถี่พ้องสามารถทำได้โดยการแปลงฟูริเยร์ (Fourier Transform) ของคลื่นที่บันทึกได้ใน Time Domain และจะสามารถหาค่าความถี่พ้องได้จากความถี่สูงสุดของคลื่น จากนั้นคำนวณค่าความเร็วคลื่นเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบ Free-Free Resonance ได้ดังสมการ

$$V_s = f \lambda = 2Lf_T \quad (2-8)$$

$$V_p = f \lambda = 2Lf_L \quad (2-9)$$

เมื่อ V_s = ค่าความเร็วคลื่นเฉือน

V_p = ค่าความเร็วคลื่นอัด

λ = ความยาวคลื่น

f = ความถี่พ้องตัวอย่าง

L = ความยาวตัวอย่าง

Mazari et al. (2015) ทำการพิจารณาผลกระทบ ของการแปรผันของความชื้น ต่อความแข็งในการทดสอบ Resilient และ Seismic Modulus ของวัสดุมวลละเอียดหลาย ชนิดได้แก่ โดยทำการปรับสภาพความชื้นในระดับต่างๆตั้งแต่แห้ง ไปจนถึงเปียกของความชื้นที่เหมาะสมผลการทดสอบพบว่าค่า Resilient และ FFR วัสดุดินเหนียว และ ททราย มีความไว ต่อการเปลี่ยนแปลงในปริมาณความชื้นในการบดอัด MR และ โมดูล FFRC ลดลงประมาณ 88% และ

85% ในทางกลับกันดินตะกอนมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้นน้อยกว่าและโมดูลัสทั้งสองลดลงประมาณ 20%

การศึกษาของ (Guthrie et al., 2002) กล่าวว่า การทดสอบ Free-Free Resonance ความเร็วคลื่นสั้นสะเทือนสามารถใช้คำนวณ Young's modulus, the shear modulus of elasticity, และ Poisson's ratio. ภายใน 1 ตัวอย่าง

2.4.4 การทดสอบความคงทนต่อความชื้น (Erodibility)

การทดสอบ Erodibility คือการทดสอบค่าการกัดเซาะ หรือการคงทนต่อความชื้นของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ โดยในปัจจุบันการก่อสร้างงานทางมักเกิดการผุกร่อน พังทลาย จากปัญหาน้ำท่วมซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของโครงสร้างทางลดลง

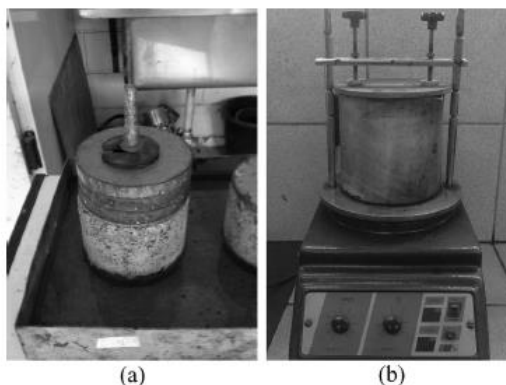
Jung et al. (2009) ในการทดสอบการสึกกร่อนมีวิธีการทดสอบจำนวนมากได้ซึ่งได้รับการพัฒนาในปี 1970 และ 1980 โดยใช้อุปกรณ์ทดสอบต่างๆอย่างไรก็ตามไม่มีการทดสอบใดที่กลายเป็นวิธีการทดสอบมาตรฐาน

โดยในงานวิจัย (Fedrigo et al., 2017) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพชั้นโครงสร้างทางด้วยวัสดุผิวทางเก่า โดยได้ทำการศึกษาเรื่องการกัดเซาะและการดูดซึม ซึ่งเป็นผลกระทบต่อโครงสร้างชั้นทาง โดยได้ทำการทดสอบด้วยวิธี Erodibility และ Capillary rise and absorption ซึ่งสามารถให้ผลที่น่าเชื่อถือได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบสองวิธีคือ Erodibility และ Capillary rise and absorption เพื่อศึกษาความคงทนและการสึกกร่อนของความชื้นของวัสดุงานทางที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์

1) การทดสอบ Erodibility

วิธีการทดสอบนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อตรวจสอบความสามารถในการสึกกร่อน (Erosion rate) ของคุณภาพโครงสร้างชั้นทางที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์โดยอ้างอิงวิธีการทดสอบของ NSW Government, Australian 2012 วิธีการทดสอบที่ T186



รูปที่ 2-14 ตัวอย่างการทดสอบ Erodibility (Fedrigo et al., 2017)

โดยในการทดสอบทำการขึ้นก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มิลลิเมตรสูง 114 มิลลิเมตร ซึ่งเท่ากับขนาดของตัวอย่าง การทดสอบ California Bearing Ratio จากนั้นทำการบ่มภายในเตาอบอุณหภูมิ 65 ± 5 °C เป็นเวลา 7 วัน โดยหลังจากบ่มครบตามเวลาที่กำหนดทำการแช่น้ำ 1 ชั่วโมงจากนั้นทำการทดสอบบนโต๊ะเขย่าที่ความถี่ 160 Hz เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นทำการล้างตัวอย่างหลุดล่อนออกมาผ่านตะแกรงขนาด 2.36 มิลลิเมตร แล้วนำไปอบแห้งบันทึกค่า M_F

ผลที่ได้จากการทดสอบคือค่าการสึกกร่อนมีหน่วยเป็น (g/min) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (2-9)

$$E = \frac{M_F}{15} \quad (2-9)$$

เมื่อ E = ค่าการสึกกร่อน

M_F = มวลละเอียดที่หลุดออกจากการทดสอบ

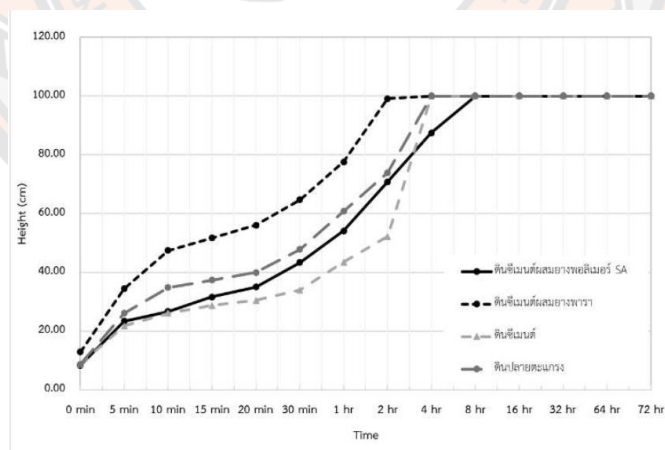
2) การทดสอบ Capillary rise and absorption

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดินโดยทำการทดสอบภายใต้มาตรฐาน AS 1141.53 (Standaras Association of Australia)

โดยการนำก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว มาแช่น้ำภายใน ถาดบรรจุน้ำอยู่ประมาณ 1 เซนติเมตร จากนั้นทำการวัดระดับการดูดซึมน้ำ โดยสามารถ คำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำในวัสดุได้ดังนี้

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

โดยในงานศึกษาของ (Hardkaeo Iradaporn. & Nusit Korakod., 2020) ได้ทำการ ปรับปรุงคุณภาพดินปลายตะแกรงด้วยซีเมนต์ น้ำยางพารา และ พอลิเมอร์ชนิด Styrene Acrylic (SA) เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุโครงสร้างชั้นทาง โดยได้ทำการทดสอบการดูดซึมน้ำด้วย วิธี Capillary rise ดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำในมวลดินสูงกว่าดิน ซีเมนต์ผสมพอลิเมอร์ยางสไตรีนอะคริลิก (SA) และ ดินซีเมนต์ผสมยางพารา จึงสรุปได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพวัสดุงานทางด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทน ต่อความชื้นได้ดี



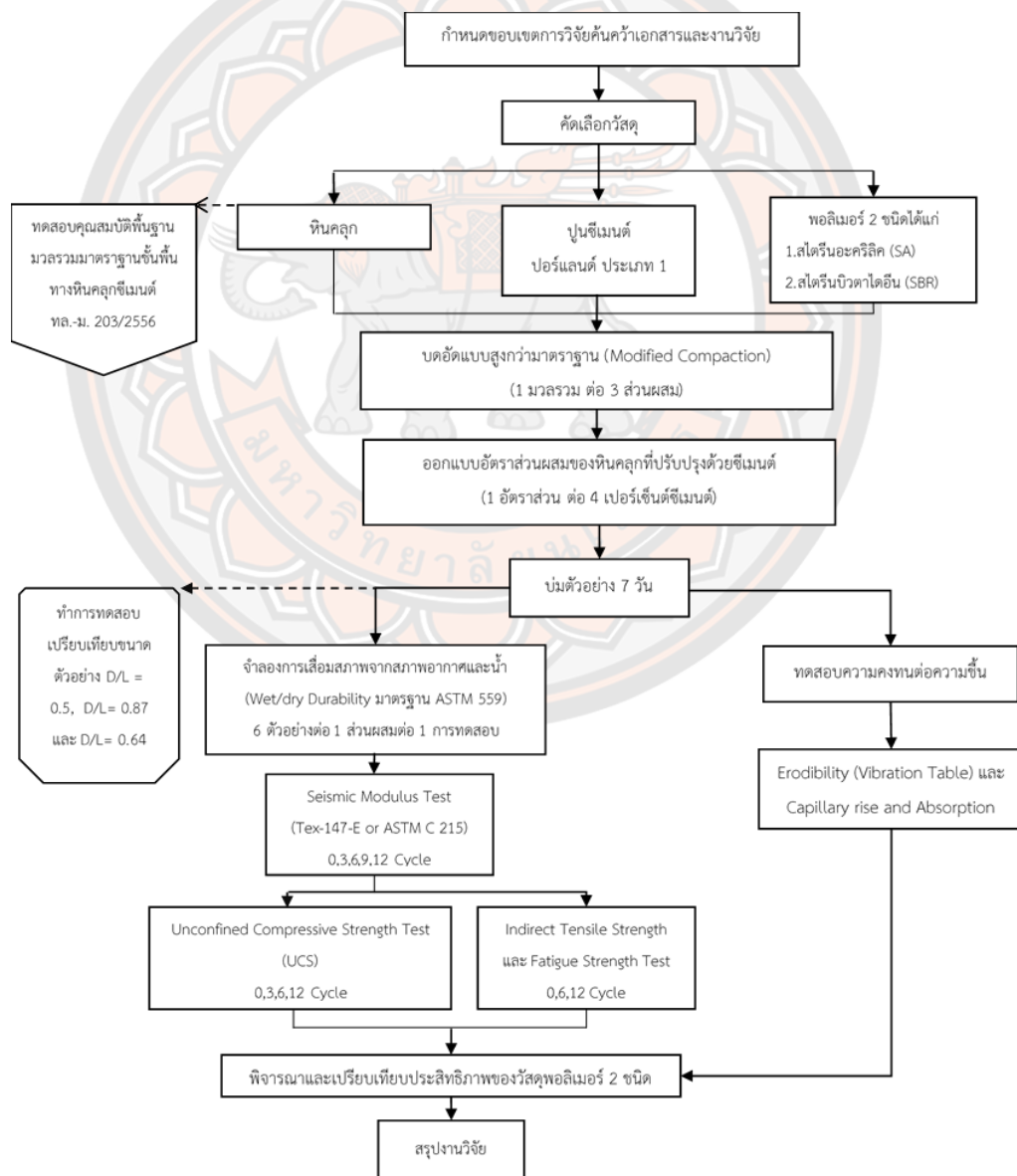
รูปที่ 2-15 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและระยะความสูงของการดูดซึมน้ำในตัวอย่าง

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

บทนี้กล่าวถึงวิธีการดำเนินงานและวิธีการทดสอบต่างๆ ในงานวิจัยนี้ซึ่งการทดสอบจะมุ่งเน้นในการประเมินประสิทธิภาพระยะยาวและความคงทนของวัสดุชั้นพื้นทางที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และ ซีเมนต์พอลิเมอร์ โดยทำการศึกษาทั้งหมด 3 อัตราส่วนผสม คือ หินคลุกผสมซีเมนต์, หินคลุกผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิดสไตรีนอะคริลิก (SA) และ หินคลุกผสมซีเมนต์พอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอิน (SBR) โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อพอลิเมอร์ 50:50 โดยมีการทดสอบดังต่อไปนี้

3.1 แผนผังวิธีการดำเนินงาน



รูปที่ 3-1 แผนการดำเนินงานวิจัย

3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ผู้วิจัยได้ทำการคัดเลือกวัสดุมวลรวม พอลิเมอร์ และ ซีเมนต์ ที่นำมาใช้ในการปรับปรุงและศึกษาผลกระทบทางด้านความชื้นสำหรับงานวิจัยนี้ มีดังนี้

3.2.1 วัสดุมวลรวม

- 1) หินคลุก 1 แהל่ง จากโรงโม่บ้านศิลา จังหวัดสุโขทัย



รูปที่ 3-2 หินคลุกโรงโม่บ้านศิลา จ.สุโขทัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำเลือกหินคลุกเป็นวัสดุมวลรวมหลักในการทดสอบ เนื่องจากหินคลุกมักนิยมใช้ในการก่อสร้างถนน เนื่องจากมีคุณสมบัติที่แข็งแรงและสามารถรับกำลังได้ดีกว่าดินประเภทอื่นโดยหินคลุกในงานวิจัยนี้เลือกมามีคุณสมบัติ ดังตาราง 3-1

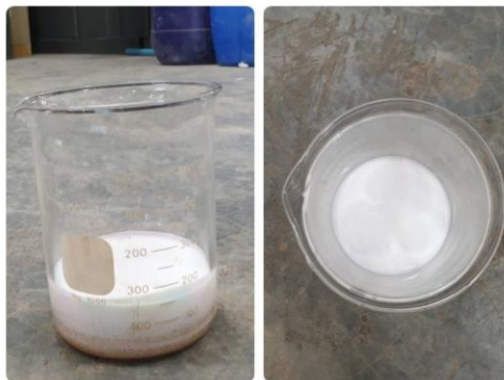
ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติพื้นฐานวัสดุหินคลุก

วิธีการทดสอบคุณสมบัติ	ผลการทดสอบ
วิธีการทดสอบหาค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate	31 %
ผลการทดสอบหาค่า Liquid Limit (LL)	25 %
ผลการทดสอบหาค่า Plastic Limit (PL)	22 %
ผลการทดสอบหาค่า Plasticity Index (PI)	3 %
ผลการทดสอบหาค่า CBR วิธีการทดสอบแบบแช่น้ำ (Soaked)	91%
ผลการทดสอบหาค่า CBR วิธีการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked)	84%

3.2.2 วัสดุผสมเพิ่ม (พอลิเมอร์)

- 1) พอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก (SA) พอลิเมอร์ชนิด Styrene Acrylic (SA) นิยมใช้สำหรับเป็นสารผสมเพิ่มเพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดึงดีขึ้น และยังมีคุณสมบัติกันน้ำได้ดี เนื่องจากคุณสมบัติที่มีความเหนียวและยืดหยุ่น SA เป็นโค

พอลิเมอร์แบบน้ำ น้ำยาอะคริลิก จะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นเนื่องจากแอมโมเนียหรืออะคริลิกและมีคุณสมบัติตามตารางที่ 3-4



รูปที่ 3-3 พอลิเมอร์ชนิด Styrene Acrylic (SA)

ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติพอลิเมอร์ชนิด Styrene Acrylic (SA)

Property	Styrene acrylic
รูปร่าง	ของเหลว
ร้อยละของแข็งทั้งหมด	54.0 – 56.0
pH	7.0 – 9.0
ความเหนียว (Brookfield RVT,CPS)	500 – 2,000
Ionic nature	Anionic
ความถ่วงจำเพาะ	1.000 - 1.100
ความหนาแน่นของไอ	< 1 water
จุดเดือด	100°C
การละลายน้ำ	กระจายน้ำในตัว

2) พอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอีน (SBR)

เป็นยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่งซึ่งผลิตโดยการเตรียมโคโพลิเมอร์ระหว่างสไตรีนและบิวตาไดอีนด้วยวิธีโพลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) เป็นที่ใช้ในงานทั่วไป ราคาไม่แพง มีหลายเกรดขึ้นกับกระบวนการสังเคราะห์สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น การผลิตสายพาน พื้นรองเท้า ฉนวนหุ้มสายไฟ และส่วนมากจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยางล้อยานพาหนะขนาดเล็กโดยใช้ผสมกับยางชนิดอื่น ๆ



รูปที่ 3-4 พอลิเมอร์ชนิด Styrene-Butadiene Rubber (SBR)

3.2.3 ปูนซีเมนต์ (Cement)

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

3.3 การทดสอบคุณสมบัติมวลรวม (หินคลุก)

การทดสอบวัสดุมวลรวมจะอ้างอิงตามมาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ ทล.-ม. 203/2556 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของมวลรวมที่นำมาใช้ในงานวิจัยโดยมี 5 การทดสอบ ดังต่อไปนี้

3.3.1 การทดสอบหาค่าการสึกหรอด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion

การทดสอบนี้ทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion เพื่อหาค่าการสึกหรอของวัสดุมวลรวม (หินคลุก) ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบกรมทางที่ ทล.-ท. 202/2515



รูปที่ 3-5 เครื่อง Los Angeles Abrasion

ก. การเตรียมตัวอย่าง

- 1) นำวัสดุมวลรวมมาล้างน้ำเพื่อทำความสะอาดจากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 – 110 องศาเซลเซียส
- 2) นำตัวอย่างไปแยกขนาดตาม Grading มาตรฐานการทดสอบ เลือก Grading ที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการใช้งานมากที่สุด

ข. การทดลอง

นำตัวอย่างที่เตรียมไว้จากข้อ 2) Abrasive Charge ตามจำนวนลูกในมาตรฐาน การทดสอบใส่เข้าไปในเครื่อง Los Angeles หมุนเครื่องด้วยความเร็วที่ 30-33 รอบต่อนาทีให้ได้จำนวนรอบตามตารางที่ 1 เมื่อหมุนได้ครบตามกำหนดแล้วให้เอาตัวอย่างออกจากเครื่องล้างส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 12 ออกทิ้ง นำส่วนที่ค้าง ตะแกรงเบอร์ 12 มาอบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส จนได้มวลคงที่จึงชั่งหามวลตัวอย่างที่เหลือ

3.3.2 ทดสอบการหาค่าความคงทน (Soundness) ของมวลรวม

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาค่าความคงทนของมวลรวมโดยใช้โซเดียมซัลเฟต หรือ แมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งความเสียหายที่เกิดจากเกลือเกลือของสารละลายในช่องว่างของมวลรวมมีลักษณะคล้ายกับความเสียหายของมวลรวมที่ต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบกรมทางที่ ทล. - ท. 213/2531



รูปที่ 3-6 การทดสอบ Soundness

ก. การเตรียมตัวอย่าง

- 1) มวลรวมเม็ดละเอียด ที่จะนำมาใช้ในการทดลองจะต้องผ่านตะแกรงขนาด 9.5 มิลลิเมตร (3/8 นิ้ว) นำมวลรวมเม็ดละเอียดดังกล่าวมาร้อนผ่านตะแกรงขนาดต่าง ๆ ตามตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 ขนาดตะแกรงและมวลของมวลรวมเม็ดละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ

ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร		มวล (กรัม)
ผ่าน	ค้าง	
0.60 (เบอร์ 30)	0.30 (เบอร์ 50)	100
1.18 (เบอร์ 16)	0.60 (เบอร์ 30)	100
2.36 (เบอร์ 8)	1.18 (เบอร์ 16)	100
4.75 (เบอร์ 4)	2.36 (เบอร์ 8)	100
9.5 (3/8")	4.75 (เบอร์ 4)	100

2) มวลรวมเม็ดหยาบ ที่จะนำมาใช้ในการทดลองจะต้องร่อนเอาส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) ออกให้หมด นำมวลรวมเม็ดหยาบดังกล่าวมาร่อนผ่านตะแกรงต่าง ๆ ตามตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 มวลของมวลรวมเม็ดหยาบที่ใช้ในการทดสอบ

ขนาดที่ใช้ทดลอง มิลลิเมตร	ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร		มวล กรัม
	ผ่าน	ค้าง	
9.5 (3/8")-4.75(เบอร์ 4)	9.5 (3/8")	4.75(เบอร์ 4)	300±5
19.0(3/4")- 9.5 (3/8") ประกอบด้วย	12.5 (1/2")	9.5 (3/8")	330±5
	19.0(3/4")	12.5 (1/2")	670±10
37.5(1 ½")-19.0(3/4") ประกอบด้วย	25.0 (1")	19.0(3/4")	500±30
	37.5(1 ½")	25.0 (1")	1000±50
	50 (2")	37.5(1 ½")	2000±200
63(2 ½")-37.5(1 ½") ประกอบด้วย	63(2 ½")	50 (2")	3000±3000
ขนาดที่โตกว่านี้ให้แบ่งเป็นช่วง ช่วงละ 25 มิลลิเมตร(1 นิ้ว) และใช้มวลในแต่ละช่วง			7000±1000

ก. วิธีการทดสอบ

- 1) แخذตัวอย่างที่เตรียมไว้ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต โดยให้สารละลายท่วมตัวอย่าง ทิ้งไว้ไม่ต่ำกว่า 16 ชั่วโมง ภายในภาชนะที่ปิดมิดชิด

- 2) นำตัวอย่างออกจากสารละลาย เมื่อแช่ครบตามเวลา พักตัวอย่างไว้ประมาณ 15 ± 5 นาที จากนั้นนำไปอบที่ อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาทั้งตัวอย่างให้เย็นจากนั้นจึงนำไปแช่ในสารละลายเดิม
- 3) ทำซ้ำกระบวนการแช่สารละลาย ทั้งหมด 5 ครั้ง
- 4) หลังจากทำการทดสอบครบ 5 ครั้ง ล้างตัวอย่างด้วยน้ำอุ่นที่อุณหภูมิประมาณ 50 ± 5 องศาเซลเซียส จนตัวอย่างสะอาด แล้วนำตัวอย่างไปอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส
- 5) หลังจากอบแห้ง นำตัวอย่างไปร่อนผ่านตะแกรงต่อไปนี้
 มวลละเอียด นำไปร่อนผ่านตะแกรงตารางที่ 3-3
 มวลหยาบ นำไปร่อนผ่านตะแกรงตามตารางที่ 3-4

3.3.3 การทดสอบหาขนาดคละของมวลรวมโดยการร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) แบบ ล้าง

การทดสอบนี้เป็นการหาขนาดคละของวัสดุมวลรวม (Gradation) โดยคุณสมบัติดังกล่าวใช้เป็นข้อมูลในการแบ่งคุณภาพของขนาดคละ หินคลุก โดยทดสอบตามมาตรฐานวิธีการทดสอบกรมทางที่ ทล.-ท. 205/2517



รูปที่ 3-7 เครื่องมือทดสอบหาขนาดคละ

ก. การเตรียมตัวอย่าง

- 1) เตรียมวัสดุหินคลุกที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ มาคลุกให้เข้ากันและแยกด้วยวิธี Quartering หรือใช้เครื่องแบ่งตัวอย่างในขณะที่ตัวอย่างมีความชื้นเพื่อลดการแยกตัว และเตรียมตัวอย่างปริมาณ ไม่น้อยกว่า 2000 กรัม

ข. วิธีการทดสอบ

- 1) นำตัวอย่างหินคลุกที่เตรียมไว้ อบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจดค่าน้ำหนักเริ่มต้น
- 2) พักตัวอย่างให้เย็นลง แล้วนำไปแช่น้ำจนท่วมตัวอย่าง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- 3) ทำการล้าตัวอย่างที่แช่น้ำครบตามเวลา ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 จนสะอาด สังกะตจากความใสของน้ำ
- 4) นำตัวอย่างที่ผ่านการล้า ค้างตะแกรงเบอร์ 200 อบที่อบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือ จนกว่า น้ำหนักตัวอย่างคงที่
- 5) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างจะได้ค่า น้ำหนักหลังจากการล้าผ่านตะแกรงเบอร์ 200 นำ ตัวอย่างที่เหลือนำร้อนผ่านตะแกรง เป็นเวลา 15 นาที

3.3.4 การทดสอบค่า Liquid Limits

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาปริมาณความชื้นในดินที่ทำให้ดินมีสภาพเหมือนของไหล สามารถไหลตัวได้โดยน้ำหนักของตัวอย่าง ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบกรมทางที่ ทล. - ท. 102/2515



รูปที่ 3-8 การทดสอบค่า Liquid Limits

ก. การเตรียมตัวอย่าง

- 1) นำตัวอย่างหินคลุกที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ตากแห้ง หรือ อบแห้งที่อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส
- 2) ร้อนตัวอย่างผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (0.425 มิลลิเมตร) ให้ได้ประมาณ 150 ถึง 200 กรัม

ข. วิธีการทดสอบ

- 1) นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ ผสมน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม ไม่เหลวและไม่แห้งจนเกินไป
- 2) ใส่ตัวอย่างในบริเวณขอบล่างของถ้วยทองเหลืองด้วยมีดปาดดิน (Spatula) ให้มีความหนาของดินส่วนที่หนาที่สุดประมาณ 10 มิลลิเมตร

- 3) ใช้เครื่องมือปาดร่องดินทำการปาดตรงกลางตัวอย่างให้เป็นร่องจนเห็นผิวพื้น ถ้วยทองเหลือง เพื่อแบ่งดินออกเป็น 2 ส่วนเท่ากัน
- 4) ทำการหมุนเคาะถ้วยทองเหลืองให้ตกกระทบกับแท่นด้วยความเร็วสม่ำเสมอ 2 ครั้งต่อวินาที พร้อมกับนับจำนวนครั้งที่เคาะ จนตัวอย่างดินเคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกัน ประมาณ 10 มิลลิเมตร ทำการจดบันทึกจำนวนครั้งในการเคาะ
- 5) นำตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบแล้ว นำไปอบที่อบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง คำนวณหาค่าปริมาณน้ำในดิน ของตัวอย่างดินแต่ละช่วงจำนวนการเคาะ
- 6) ทำซ้ำขั้นตอน 1 – 4 แบ่งจำนวนการเคาะดังนี้
 - 30-35 ครั้ง
 - 25-30 ครั้ง
 - 20-25 ครั้ง
 - 15-20 ครั้ง

3.3.5 การทดสอบหาค่า Plastic Limit (PL) และ Plasticity Index (PI)

การทดสอบนี้สามารถทำร่วมกับการทดสอบที่ 3.4.4 และสามารถใช้อุปกรณ์เตรียมตัวอย่างร่วมกันได้ การทดสอบนี้เป็นการทดสอบตามมาตรฐานวิธีการทดสอบกรมทางที่ ทล.-ท.103/2515

ก. วิธีการทดสอบ

- 1) นำตัวอย่างดิน ประมาณ 20 กรัม มาคลุกเคล้ากับน้ำให้มีความชื้นสม่ำเสมอ
- 2) แบ่งตัวอย่างดินที่คลุกน้ำแล้วประมาณ 8 กรัม นำไปครึ่งด้วยฝ่ามือบนแผ่นกระจก จำนวน 80-90 ครั้งต่อนาที ไม่เกิน 2 นาที จนเป็นรูปวงรี ขนาดสม่ำเสมอเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร และมีรอยแตกขึ้นที่ผิวตัวอย่าง
- 3) หากไม่มีรอยแตกที่ผิวตัวอย่างให้ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1-2
- 4) แบ่งตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบแล้ว นำไปอบที่อบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง คำนวณหาค่าปริมาณน้ำในดิน
- 5) ทำการทดสอบอย่างน้อย 2 ตัวอย่าง ค่าขีดจำกัดพลาสติกที่ได้จากการทดสอบต้องไม่ต่างกันเกินร้อยละ 2.6 ถ้าเกินร้อยละ 2.6 ให้ทำการทดสอบใหม่

3.3.6 การทดสอบ California Bearing Ratio Test: CBR

การทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของหินคลุกตัวอย่างที่บดอัดทำตามมาตรฐานของกรมทางหลวง การทดลองที่ ทล-ท. 109/2017 โดยได้ทำการทดสอบ 2 วิธี คือ การทดสอบแบบแช่น้ำ (soaked) และ การทดสอบแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked)



รูปที่ 3-9 การทดสอบ CBR แบบแช่น้ำ

ก. เตรียมตัวอย่าง

- 1) เตรียมหินคลุก 6000 กรัม ผสมกับน้ำในปริมาณที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดสอบ Compaction test แบบสูงกว่ามาตรฐาน
- 2) ทำการบดอัดใน mold CBR ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มิลลิเมตร สูง 114 มิลลิเมตร โดยทำการบดอัด จำนวน 5 ชั้น ชั้นละ 12 25 และ 56 ครั้ง

ข. การทดสอบ

- 1) นำก้อนตัวอย่างที่ทำการบดอัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว ไปทดสอบจากนั้นบันทึกแรงกด เมื่อ Penetration ถึงค่าที่กำหนดตามมาตรฐาน จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลเทียบกับค่า CBR มาตรฐาน

3.4 การออกแบบอัตราส่วนผสมชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์

ในการออกแบบอัตราส่วนผสมเพื่อหาปริมาณซีเมนต์ตามมาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ มาตรฐานที่ ทล. -ม. 203/2556 ที่ทำให้ค่ากำลังการรับแรงอัดจะใช้ปริมาณน้ำที่ปริมาณน้ำในดินที่ให้ความแน่นแห้งสูงสุด (Optimum Moisture Content : OMC) จากการทดสอบที่ 3.5.1 แต่เนื่องด้วยในงานวิจัยนี้ได้มีการนำพอลิเมอร์เป็นสารผสมเพิ่มในการออกแบบที่ร้อยละ 50 ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) จึงใช้อัตราส่วนน้ำต่อพอลิเมอร์ 50:50 แทนปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC)

3.4.1 การทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน

การทดสอบนี้จะทำการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) เพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) และ ค่า Maximum Dry Density (MDD) ของส่วนผสมระหว่าง หินคลุกผสมน้ำ, หินคลุกผสมน้ำและพอลิเมอร์ชนิดสไตรีนอะคริลิก (SA) ในอัตราส่วน 50:50 และ หินคลุกผสมน้ำและพอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอิน (SBR) ในอัตราส่วน 50:50 ตามมาตรฐานกรมทางหลวงตามมาตรฐาน ทล.-ท.108/2517

ก. การเตรียมตัวอย่าง

- 1) นำวัสดุรวมรวมหินคลุก ทำการคัดแยกขนาดมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่า 19 มิลลิเมตร (ค้ำตะแกรงเบอร์ 3/4) ทิ้งไป
- 2) ถ้าขนาดของตัวอย่างก้อนใหญ่ที่สุด มีขนาดเล็กกว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้นำตัวอย่างมาทำให้แห้งโดยวิธีการตากแห้ง และทำ Quartering หรือใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่างแล้วคลุกตัวอย่างให้เข้ากัน
- 3) ทำการชั่งตัวอย่างประมาณ 3,000 กรัม

ข. วิธีการทดสอบ

- 1) นำตัวอย่างมาคลุกเคล้าให้เข้ากันในภาตผสม
- 2) เติมน้ำปริมาณหนึ่ง โดยปกติมักจะเริ่มต้นที่ประมาณ 2% ต่ำกว่าปริมาณน้ำที่ให้ ความแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content)
- 3) ทำการคลุกเคล้าตัวอย่างและน้ำให้เข้ากัน
- 4) แบ่งตัวอย่างดินที่คลุกเคล้าไว้แล้ว เป็นกองๆ กองละเท่าๆ กัน จำนวน 5 กอง
- 5) นำดินใส่ลงในแบบซึ่งมีปลอกสวมเรียบร้อย ทีละกอง แล้วทำการบดอัดโดยค้อน ทีละชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง
- 6) เมื่อบดอัดครบ 5 ชั้น ทำการถอดปลอกออกแล้ว ใช้เหล็กปาดหน้าให้เรียบทำการเกลี่ยผิวหน้าตัวอย่างให้สม่ำเสมอ
- 7) ทำการชั่งน้ำหนัก ดินที่ผ่านการบดอัดในแบบ แล้วนำดินออกจากแบบเก็บดินตัวอย่างที่ผ่านการบดอัดนำไปอบที่น้ำไปอบที่อบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง คำนวณหาค่าปริมาณความชื้น
- 8) ดำเนินการตามข้อ 1 ถึง 7 โดยเพิ่มน้ำขึ้นร้อยละ 2% จนกว่าจะได้ความแน่นลดลงจึงหยุดการทดลอง หรืออาจลดน้ำที่ผสม ในกรณีเมื่อเพิ่มน้ำแล้วได้ความแน่นลดลงเพื่อให้เขียน Curve

- 9) เขียน Curve ระหว่างความแน่นแห้ง และปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ w ก็จะทราบค่าความแน่นแห้งสูงสุด Maximum Dry Density และปริมาณน้ำในดินที่ทำให้ความแน่นแห้งสูงสุด (Optimum Moisture Content)

3.4.2 การออกแบบอัตราส่วนซีเมนต์พอลิเมอร์ที่เหมาะสม

การออกแบบหาปริมาณซีเมนต์ที่นำมาผสมกับหินคลุกและน้ำ-พอลิเมอร์ ให้ถือเอาค่ากำลังรับแรงอัดแห้งตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ได้จากการทดลองตามวิธีที่ 3.6.1 “วิธีการทดลองหาค่ากำลังอัดแกนเดี่ยว Unconfined Compressive Strength” โดยตัวอย่างทดสอบจะถูกบดอัดในแบบการวิธีที่ 3.4.1 วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” ภายหลังจากการบ่มในถุงพลาสติกเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำไปแช่น้ำนาน 2 ชั่วโมง จะต้องมียังมีค่าไม่น้อยกว่า 2413 กิโลพาสคัล (350 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) โดยทำการทดสอบ 3 ตัวอย่างต่อร้อยละซีเมนต์

โดยทำการทดสอบ 1 ส่วนผสมต่อ 3 ตัวอย่าง รวม 9 ตัวอย่าง

ก. การออกแบบเพื่อหาปริมาณร้อยละซีเมนต์ที่เหมาะสม

1. กำหนดปริมาณซีเมนต์ ร้อยละ 1, 2, 3, และ 4 ของปริมาณหินคลุกโดยนำหนักที่ใช้ทดสอบ
2. เตรียมน้ำและพอลิเมอร์ในอัตราส่วน น้ำต่อพอลิเมอร์ 50:50 โดยกำหนดจากค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุหินคลุก
3. ทำการคลุกเคล้าให้เข้ากัน แล้วทำการบดอัด Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน
4. นำตัวอย่างออกจากแบบบ่มในถุงพลาสติกปิดมิดชิดเพื่อมิให้ความชื้นเปลี่ยนแปลงเป็นเวลา 7 วันเมื่อครบเวลาการบ่ม นำก้อนตัวอย่างไปแช่น้ำนาน 2 ชั่วโมง จากนั้นพักตัวอย่างให้ระบายน้ำออกเป็นเวลา 15 นาที
5. ทำการทดสอบทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดี่ยว (Unconfined Compressive Strength : UCS) ของดิน ตามวิธีการทดลองที่ ทล. ท. 108
6. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดี่ยวกับปริมาณร้อยละของซีเมนต์
7. เปรียบเทียบหาปริมาณร้อยละของซีเมนต์ที่ทำให้ค่ากำลังอัดแกนเดี่ยวมีค่าเท่ากับ 2,413 กิโลพาสคัล (350 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

3.5 การเปรียบเทียบค่าขนาดตัวอย่างที่แตกต่าง

เนื่องด้วยตามมาตรฐานการทดสอบ Seismic Modulus Test (Free-Free Resonance: FFR) ASTM C215-02 ได้มีการกำหนดตัวอย่างทดสอบให้มีขนาด $D/L = 0.5$ ในทางกลับกัน มาตรฐานกรมทางหลวงในการออกแบบอัตราส่วนหินคลุกผสมซีเมนต์หรือการทดสอบความทนทาน (Durability Test) โดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying) ขนาดตัวอย่างจะใช้ mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว หรือมีอัตราส่วน $D/L = 0.87$

ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการเปรียบเทียบค่าการทดสอบ Seismic Modulus Test ที่มีอัตราส่วน $D/L = 0.5$, $D/L = 0.87$ และ $D/L = 0.64$ เพื่อให้ได้ผลที่ชัดเจน

3.5.1 ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน D/L เท่ากับ 0.87

ในการทดสอบนี้ทำการเปรียบเทียบทั้ง 3 วัสดุ โดยทำการขึ้นตัวอย่างด้วย Compaction Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว ทำการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) บดอัดชั้นละ 25 ครั้ง จำนวน 5 ชั้น จำนวน 3 ตัวอย่าง ต่อ 1 วัสดุ

3.5.2 ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน D/L เท่ากับ 0.64

โดยทำการขึ้นตัวอย่างขนาดเท่ากับตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูงประมาณ 2.6 นิ้ว ทำการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) บดอัดชั้นละ 25 ครั้ง จำนวน 3 ชั้น จำนวน 3 ตัวอย่าง ต่อ 1 วัสดุ

3.5.3 ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน D/L เท่ากับ 0.5

ทำการขึ้นก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 8 นิ้ว ทำการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) บดอัดชั้นละ 25 ครั้ง จำนวน 8 ชั้น จำนวน 3 ตัวอย่าง ต่อ 1 วัสดุ



รูปที่ 3-10 แบบตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว $D/L = 0.5$

3.6 การจำลองการเสื่อมสภาพของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุง

ในการทดสอบความคงทนต่อความชื้นเปรียบเสมือนการจำลองสภาพ วัสดุชั้นพื้นทางที่ผ่านการใช้งานผ่านสภาพอากาศจากนั้น นำไปศึกษาการรับกำลังของวัสดุที่ผ่านการทดสอบ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบดังนี้

3.6.1 การทดสอบความทนทาน (Durability Test) โดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying)

ในการทดสอบนี้เปรียบเสมือนการจำลองสภาพอากาศที่มีสภาวะร้อนและเปียกสลับกัน โดยการทดสอบนี้ทำภายใต้มาตรฐาน ASTM D559 ภายใต้มาตรฐานได้กำหนดรอบการทดสอบเป็นทั้งหมด 12 รอบ ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบต่อการรับกำลังของวัสดุที่ผ่านการทดสอบนี้ในแต่ละจำนวนรอบที่กำหนด โดยทำการทดสอบ 1 อัตราส่วนผสม ต่อ 6 ตัวอย่าง ต่อ 1 รอบการทดสอบ รวม 18 ตัวอย่างต่อรอบการทดสอบ

ก. วิธีการเตรียมตัวอย่าง

- 1) ทำการขึ้นก้อนตัวอย่างวัสดุหินคลุกซีเมนต์-พอลิเมอร์โดยวิธีการบดอัด Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐานในอัตราส่วนที่ได้ทำการออกแบบไว้ข้างต้น จากนั้นทำการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 7 วัน

ข. วิธีการทดสอบ

- 1) นำตัวอย่างที่ได้ทำการบ่มครบตามเวลามาแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 ชั่วโมงแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก
- 2) นำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 71 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 42 ชั่วโมง จากนั้นพักตัวอย่างให้เย็นลงแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก
- 3) ทำการขีดตัวอย่างด้วยแปรงทองเหลือง ให้รอบตัวอย่าง จำนวนประมาณ 18-20 ครั้ง ผิวด้านบนและด้านล่างตัวอย่างขีดด้านละ 2-4 ครั้ง ในการขีดใช้แรงประมาณ 1.33 กิโลกรัม จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก
- 4) ในการทดสอบจากข้อ 1.- 3. นับเป็นการทดสอบ 1 รอบ จากนั้นทำให้ครบรอบตามที่กำหนด แล้วจึงนำไปทดสอบผลกระทบการรับกำลังของวัสดุต่อไป

3.7 การทดสอบคุณสมบัติด้านการรับกำลังของวัสดุที่ผ่านการจำลองการเสื่อมสภาพโดยวิธีการทดสอบ Wetting & drying

3.7.1 การทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength: UCS)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียวของวัสดุชั้นพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวง การทดลองที่ ทล.- ท. 105/2515 โดยในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบวัสดุหินคลุกปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ ที่ผ่านการทดสอบ Wetting-and-Drying Test จำนวน 0,3,6,12 รอบ นำมาทำการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (UCS) เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลกระทบของสภาพอากาศต่อชั้นพื้นทางโดยทำการทดสอบรอบละ 3 ก้อนตัวอย่าง ทั้งหมด 4 รอบ รวม 36 ก้อนตัวอย่าง



รูปที่ 3-11 เครื่องมือทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

ก. วิธีการทดสอบ

- 1) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของตัวอย่าง จากนั้นนำไปแช่ในน้ำโดยให้น้ำท่วมก้อนตัวอย่างเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างขึ้นมาพัก 15 นาที
- 2) ทำการติดตั้งเครื่องมือและตัวอย่างโดยวางตัวอย่างให้ผิวด้านบนบนก้อนตัวอย่างสัมผัสกับเครื่องให้เต็มหน้าตัด ปรับแทนวางให้ตัวอย่างสัมผัสกับตัวอ่านแรง
- 3) ตั้งค่าอัตราการเคลื่อนที่แนวตั้งโดยคิดเป็นอัตราความเครียด (strain Rate) ร้อยละ 2 ของความสูงตัวอย่าง ต่อนาที
- 4) ทำการบันทึกน้ำหนักกดและระยะการเคลื่อนที่ลงในแนวตั้ง ทุกๆ 10 วินาที จนกระทั่งค่าแรงกดลดลงจึงหยุดทำการทดสอบ

3.7.2 การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength: IDT)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาค่ากำลังดึงทางอ้อม ทำการทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM 6931-17 เป็นการทดสอบแบบทำลายก้อนตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์หาค่าการรับแรงดึงของก้อนตัวอย่าง ที่ผ่านการจำลองการเสื่อมสภาพและนำค่าที่ได้เป็นตัวกำหนดค่ากำลังรับแรงดึงในการทดสอบ Fatigue Strength Test โดยในงานวิจัยนี้จะนำตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบ Wetting and Drying ที่ จำนวน 0, 6, 12 รอบ จำนวน 2 ตัวอย่าง 1 ส่วนผสม/รอบ รวม 18 ตัวอย่าง

การทดสอบนี้ทำการขึ้นก้อนตัวอย่างแบบทรงกระบอกขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) สูงประมาณ 70 มิลลิเมตร ทำการบดอัดชั้นละ 25 ครั้ง จำนวน 3 ชั้น นำไปทดสอบ Wetting and Drying เมื่อได้จำนวนรอบที่กำหนด นำตัวอย่างแช่น้ำ 2 ชั่วโมงจากนั้นทำการ นำตัวอย่างออกปล่อยให้สภาพปกติเป็นเวลา 15 นาที ก่อนนำไปทดสอบ

การตั้งค่าอุปกรณ์ทำการกำหนดค่าอัตราการเคลื่อนที่แนวตั้งด้วยอัตราเร็ว 50 ± 5 มิลลิเมตร ต่อนาที จนตัวอย่างพังทลาย การบันทึกค่าน้ำหนักสูงสุด

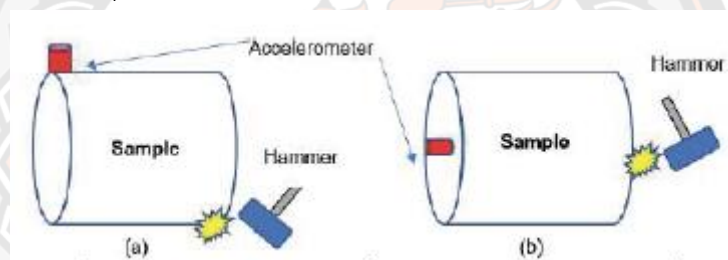


รูปที่ 3-12 การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม

3.7.3 การทดสอบ Seismic Modulus Test (Free-Free Resonance: FFR)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบคลื่นสั่นสะเทือนด้วยวิธี FFR ตามมาตรฐาน ASTM C215-02 เป็นการทดสอบก้อนตัวอย่างแบบไม่ทำลาย เพื่อวิเคราะห์ความถี่สั่นพ้อง (Resonant frequency) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่าง โดยทำการทดสอบก้อนตัวอย่างหลังจากผ่านการทดสอบ Wetting and Drying Test จำนวน 0,3,6,12 รอบ เพื่อวิเคราะห์หาค่า Modulus

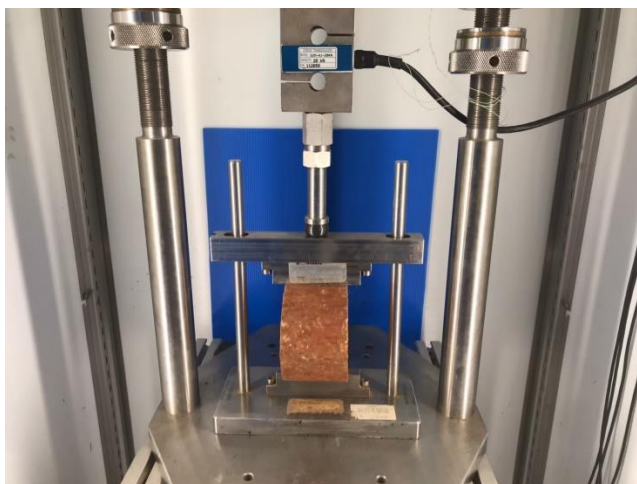
โดยรูปแบบในการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบจะมีลักษณะ 3 รูปแบบซึ่งจะให้ค่าที่แตกต่างกัน สำหรับ Transverse รูป (a) Longitudinal รูป (b) และ Torsional รูป (c) และในการติดตั้ง Accelerometer ตามรูป 3-13 ต้องทำการหาจากระยะปีบริเวณที่ติดอุปกรณ์เพื่อให้เกิดการสัมผัสระหว่างตัวคลื่นกับก้อนตัวอย่างอย่างสนิท จากนั้นทำการต่อตัวรับสัญญาณเข้ากับ Spectrum Analyzer ซึ่งเชื่อมกับคอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผล โดยก้อนตัวอย่างนั้นจะถูกแขวนไว้กับแท่นห้อยโดยใช้ลวดยึดกับตัวอย่างเพื่อไม่ให้ตัวอย่างสัมผัสกับพื้นดินและทำให้ตัวอย่างอยู่ในสภาพ Free-Free Condition มากที่สุด หลังจากนั้น ทำการเคาะตัวอย่าง 5 ครั้ง ต่อ 1 การทดสอบ



รูปที่ 3-13 แสดงรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบความถี่สั่นพ้อง (a) Transverse และ (b) Longitudinal (วุฒิมกรณ โสพรรณรัตน์ , 2020)

3.7.4 การทดสอบ Fatigue Strength Test

การทดสอบนี้เป็นการจำลองสภาพชั้นทางที่ผ่านการรับแรงกระทำซ้ำๆ เปรียบเสมือนการรับแรงของชั้นโครงสร้างทางที่รับแรงจากการสัญจรของยานพาหนะ โดยในงานวิจัยนี้จะนำตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบ Wetting and Drying ที่จำนวน 0, 6, 12 รอบมาทำการทดสอบ เพื่อหาค่า Fatigue life (N) จากนั้นนำมาศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบจากการทดสอบ Wetting and Drying โดยทำการทดสอบ ส่วนผสมละ 4 ตัวอย่าง (ผ่านการทดสอบ Wetting and Drying 2 ตัวอย่างและ บ่มปกติ 2ตัวอย่าง) ต่อรอบการทดสอบ รวม 12 ตัวอย่างต่อรอบการทดสอบ



รูปที่ 3-14 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ Fatigue Strength Test

โดยในการทดสอบนี้ทำการขึ้นก้อนตัวอย่างแบบทรงกระบอกขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) สูงประมาณ 70 มิลลิเมตร จากนั้นทำการบดอัดชั้นละ 25 ครั้ง จำนวน 3 ชั้น แล้วนำไปทดสอบ Wetting and Drying เมื่อได้จำนวนรอบที่กำหนด นำตัวอย่างแช่น้ำ 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการ นำตัวอย่างแยกปล่อยในสภาพปกติเป็นเวลา 15 นาที ก่อนนำไปทดสอบ

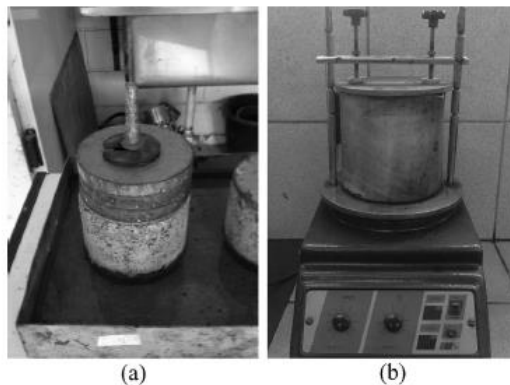
การทดสอบนี้ใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) โดยใช้โหมด โปรแกรมการให้แรงซ้ำๆ แรงในการทดสอบ 0.5IDT ใช้ความถี่ในการให้แรง 10 Hz รอจนตัวอย่างวิบัติจากนั้นทำการประเมินผล Fatigue life

3.8 การทดสอบความคงทนต่อความชื้นของหินคลุกที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์

การทดสอบความคงทนต่อความชื้นเป็นวิธีการที่ประยุกต์ขึ้นมาเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบค่าความคงทนของวัสดุงานทางที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และ พอลิเมอร์ ในงานวิจัยนี้

3.8.1 การทดสอบ Erodibility Tests

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบการต้านทานการพังทลายของดิน โดยการทดสอบนี้ทำภายใต้การประยุกต์ใช้ใน ประเทศออสเตรเลีย “Erodibility of stabilised road construction materials: Test Method T186” โดยมีการเตรียมตัวอย่าง 3 ตัวอย่างต่อ 1 อัตราส่วนผสม รวมทั้งหมด 9 ตัวอย่าง



รูปที่ 3-15 การทดสอบการทดสอบ Erodibility tests (Fedrigo et al., 2017)

ก. วิธีการเตรียมตัวอย่าง

- 1) ทำการขึ้นก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มิลลิเมตร สูง 114 มิลลิเมตร (ใช้แบบตัวอย่าง California Bearing Ratio) โดยทำการขึ้นก้อนตัวอย่างวิธีเดียวกัน
- 2) หลังจากนำก้อนตัวอย่างออกจากแบบ ทำการบ่มตัวอย่าง ในเตาอบที่อุณหภูมิ 65 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

ข. การทดสอบ

- 1) นำตัวอย่างที่ผ่านการบ่มครบตามเวลา มาใส่ในภาตโลหะ โดยใส่น้ำภายในภาตสูงประมาณ 25 มิลลิเมตร และรักษาระดับน้ำไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และวางแผ่นเหล็ก น้ำหนักประมาณ 6.75 กิโลกรัมบนตัวอย่างให้แน่น เพื่อจำลองปริมาณการจราจร
- 2) ชั่งน้ำหนักภาชนะโลหะกับน้ำ บันทึกค่า M_5
- 3) ยึดภาชนะโลหะทรงกระบอกนำตัวอย่างใส่ข้างในภาชนะทรงกระบอกเข้ากับโต๊ะเขย่าให้แน่น
- 4) นำก้อนตัวอย่างบรรจุลงภาชนะโลหะทรงกระบอก แล้วทำการเติมน้ำภายในภาชนะ 200 มิลลิลิตร และวางแผ่นเหล็ก น้ำหนักประมาณ 6.75 กิโลกรัมบนตัวอย่าง แล้วทำการยึดตัวอย่างให้แน่น
- 5) เขย่าชิ้นงานโดยโต๊ะเขย่าเป็นเวลา 15 นาที
- 6) นำแผ่นเหล็กและ ส่วนที่เหลือของตัวอย่างออกจากภาชนะโลหะ
- 7) ทำการล้างตัวอย่างที่อยู่ในภาชนะผ่านตะแกรงเบอร์ 2.36 มิลลิเมตร
- 8) นำตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงขนาด 2.36 มิลลิเมตร ใส่ภาตที่เตรียมไว้
- 9) อบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จากนั้นบันทึกค่า

3.8.2 การทดสอบ Capillary rise and Absorption

การทดสอบ การต้านทานการดูดซึมน้ำ Capillary Rise Test ที่ผ่านการปรับปรุงด้วย Cement พอลิเมอร์ Styrene Butadiene Rubber (SBR) และ Styrene Acrylic (SA) ทำการทดสอบภายใต้มาตรฐาน AS 1141.53 (standard Association of Australia) โดยทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ก้อน รวม 9 ก้อนตัวอย่าง

ก. วิธีการเตรียมตัวอย่าง

- 1) เตรียมตัวอย่างโดยวิธี Modified Compaction Test จากนั้นทำการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน

ข. วิธีการทดสอบ

- 1) นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ พักจนอุณหภูมิคงที่
- 2) แช่น้ำในภาต หรือภาชนะกันแบน โดยความสูงน้ำจากก้นภาตสูง 1 เซนติเมตร แช่ไว้เป็นเวลา 3 วัน
- 3) วัดความสูงของระดับน้ำที่ก้นตัวอย่าง 5 10 15 20 30 นาที และ 1 2 4 8 16 32 64 72 ชั่วโมง

3.9 การวิเคราะห์ผล

โดยการวิเคราะห์ผลการทดสอบในงานวิจัยจะแบ่งออกตามวัตถุประสงค์โครงการ เป็น 2 วัตถุประสงค์ดังนี้

3.9.1 ประเมินประสิทธิภาพระยะยาวและความคงทนของชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

โดยทำการประเมินประสิทธิภาพของวัสดุระหว่างวัสดุหินคลุกที่ได้รับปรับปรุงด้วยซีเมนต์, หินคลุกผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิดสไตรีนอะคริลิก (SA) และ หินคลุกผสมซีเมนต์พอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) ซึ่งได้จากผลการทดสอบต่อไปนี้

1) การประเมินประสิทธิภาพระยะยาวของชั้นพื้นทาง

- ผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength)
- ผลการทดสอบ Seismic Modulus Test (Free-Free Resonance)
- ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength)
- ผลการทดสอบ Fatigue Strength Test

2) การประเมินความคงทนต่อความชื้นของชั้นพื้นทาง

- ผลการทดสอบ Erodibility Tests
- ผลการทดสอบ Capillary rise and Absorption

3.9.2 เปรียบเทียบการประเมินคุณสมบัติชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมและแบบไม่ทำลายจากตัวอย่างที่ทำการเสื่อมสภาพด้วยการทดสอบเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying)

โดยมีผลการทดสอบตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการจำลองการเสื่อมสภาพด้วยการทดสอบเปียกสลับแห้งและตัวอย่างควบคุมดังนี้

1) การทดสอบโดยวิธีดั้งเดิม

- ผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength)
- ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength)
- ผลการทดสอบ Fatigue Strength Test

2) การทดสอบโดยวิธีไม่ทำลาย

- ผลการทดสอบ Seismic Modulus Test (Free-Free Resonance)

เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าการพัฒนาคุณสมบัติต่างๆของวัสดุ ทั้งที่ผ่านการจำลองการเสื่อมสภาพและตัวอย่างควบคุม ของวัสดุระหว่างวัสดุหินคลุกที่ได้รับปรับปรุงด้วยซีเมนต์, หินคลุกผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิดสไตรีนอะคริลิก (SA) และ หินคลุกผสมซีเมนต์พอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอีน (SBR)

บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 คุณสมบัติวัสดุหินคลุก

ในงานวิจัยนี้ใช้หินคลุกจากโรงโม่หินบ้านศิลา จ.สุโขทัย เป็นวัสดุมวลรวมสำหรับศึกษาการปรับปรุงคุณภาพชั้นพื้นทางด้วยซีเมนต์และซีเมนต์พอลิเมอร์โดยทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานตามมาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ มาตรฐานที่ ทล. -ม. 203/2556 แสดงผลการทดสอบดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุหินคลุก

วิธีการทดสอบคุณสมบัติ	ผลการทดสอบ	ทล.-ม. 203/2556
วิธีการทดสอบหาค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate	31 %	ไม่เกินร้อยละ 40
ผลการทดสอบหาค่า Liquid Limit (LL)	25 %	ไม่เกินร้อยละ 25
ผลการทดสอบหาค่า Plastic Limit (PL)	22 %	-
ผลการทดสอบหาค่า Plasticity Index (PI)	3 %	ไม่เกินร้อยละ 6
ผลการทดสอบหาค่า CBR วิธีการทดสอบแบบแช่น้ำ (Soaked)	91%	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80
ผลการทดสอบหาค่า CBR วิธีการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked)	84%	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80

จากตารางที่ 4-1 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุหินคลุก พบว่า ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานตามมาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ มาตรฐานกรมทางหลวง ผ่านตามเกณฑ์กำหนดทุกการทดสอบ

4.2 การออกแบบส่วนผสมวัสดุงานทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และซีเมนต์พอลิเมอร์

โดยในการศึกษานี้จะแบ่งวัสดุในการออกแบบเป็น 3 วัสดุดังนี้

1. วัสดุชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (PMC)
2. วัสดุชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ ชนิดสไตรีนอะคริลิก (PMCSA)
3. วัสดุชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ ชนิดสไตรีนบิวตาไดอีน (PMCSBR)

โดยในการออกแบบส่วนผสมวัสดุชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์มีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

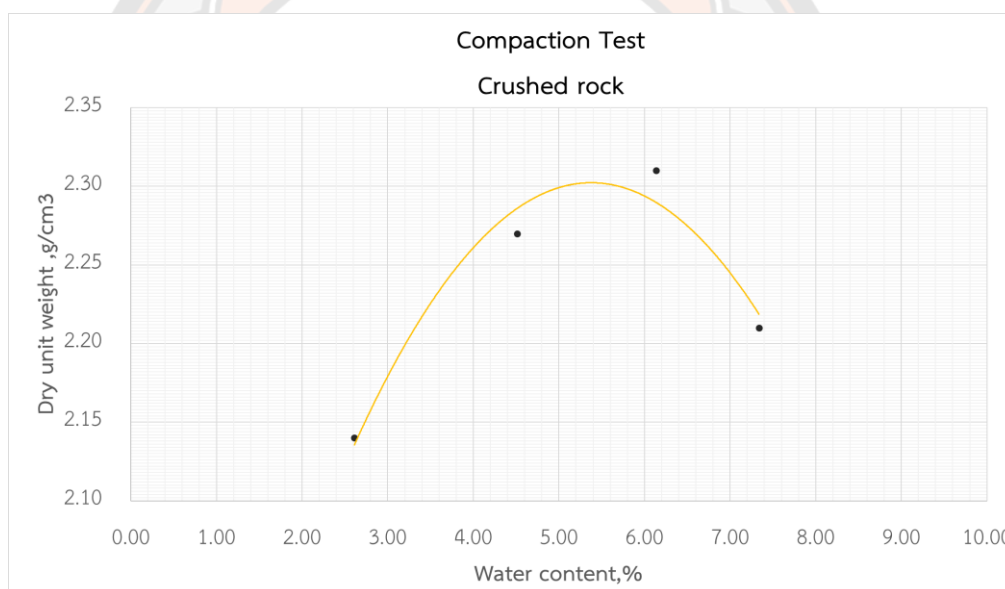
1. ทำการบดอัดวัสดุหินคลุกแบบสูงกว่ามาตรฐานเพื่อหาค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ที่ทำให้หินคลุกมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density)

2. บดอัดวัสดุด้วยปริมาณน้ำที่ OMC และทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) ที่อายุ 7 วัน

3. เมื่อได้ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมจะยึดปริมาณซีเมนต์ของวัสดุหินคลุกเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุชั้นพื้นทางที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์

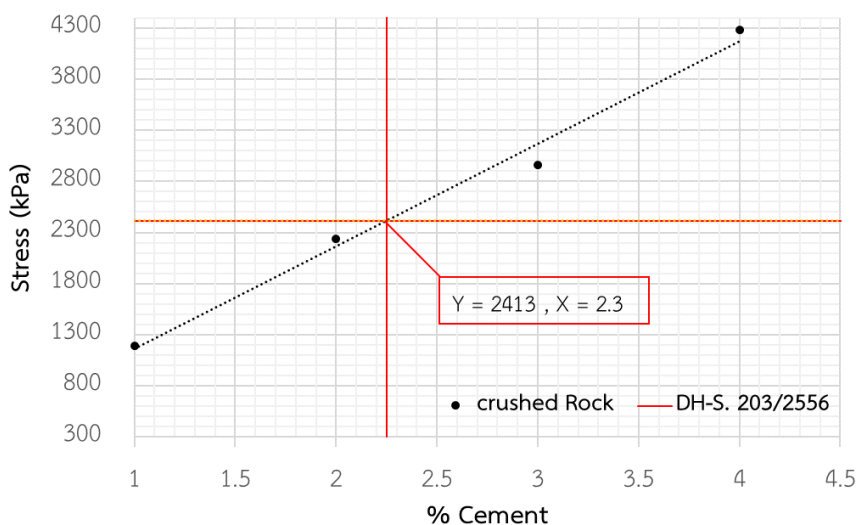
4.2.1 การออกแบบหาปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม

โดยในการออกแบบหาปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้จะทำการหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม(OMC)ของวัสดุหินคลุกก่อนเพื่อนำมาหาปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ OMC



รูปที่ 4-1กราฟแสดงความสัมพันธ์ความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุหินคลุก ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุหินคลุกพบว่า ค่าความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุหินคลุกอยู่ที่ร้อยละ 5.8 และมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดอยู่ที่ 2.31 g/cm³

จากนั้นทำการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ OMC ที่ปริมาณร้อยละ 1,2,3 และ 4 บ่มตัวอย่างจนครบ 7 วันแล้วทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

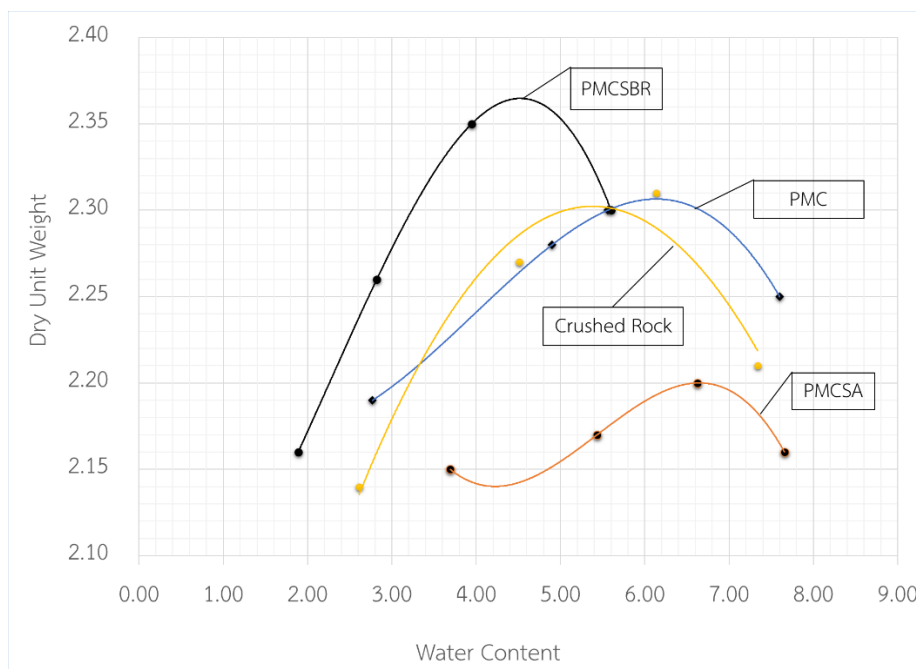


รูปที่ 4-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียวและปริมาณซีเมนต์วัสดุหินคลุก

ตามมาตรฐาน ชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ทล.-ม. 203/2556 กำหนดให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวต้องมีค่ามากกว่า 2,413 kPa จากผลการทดสอบกำลังแกนเดียวของวัสดุหินคลุกที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์แสดงรูปที่ 4-2 พบว่าปริมาณซีเมนต์ที่ร้อยละ 2.3 ของมวลรวมทั้งหมดจะมีค่ากำลังอัดแกนเดียว เท่ากับ 2,413 kPa ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ ปริมาณซีเมนต์ที่ร้อยละ 2.3 ในการทดสอบตัวอย่างต่อไป

4.2.2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุหินคลุก

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเพื่อหาค่าความชื้นที่เหมาะสมและค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดแสดงดังรูปที่ 4-3 และตารางที่ 4-2



รูปที่ 4-3 กราฟความสัมพันธ์ความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุหินคลุกที่ปรับปรุงซีเมนต์ และซีเมนต์พอลิเมอร์

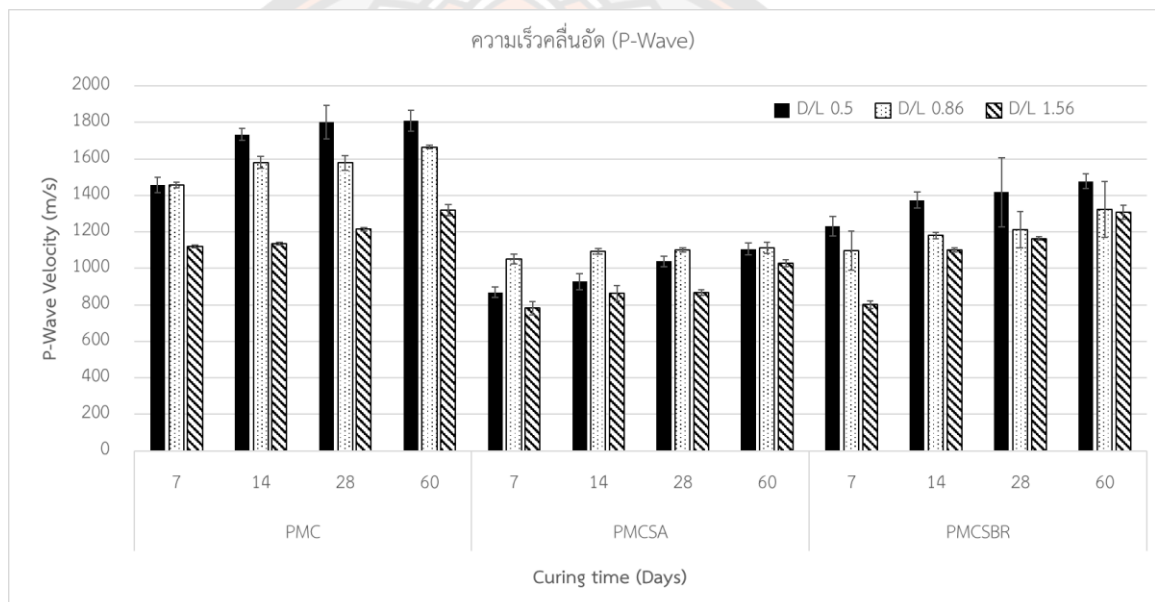
ตารางที่ 4-2 สรุปความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุหินคลุกที่ปรับปรุงซีเมนต์ และซีเมนต์พอลิเมอร์

Type	Optimum moisture (%)	Maximum dry unit weight (g/cm ³)
Crushed Rock	5.8	2.31
PMC	6.2	2.31
PMCSA	5.3	2.28
PMCSBR	4.5	2.36

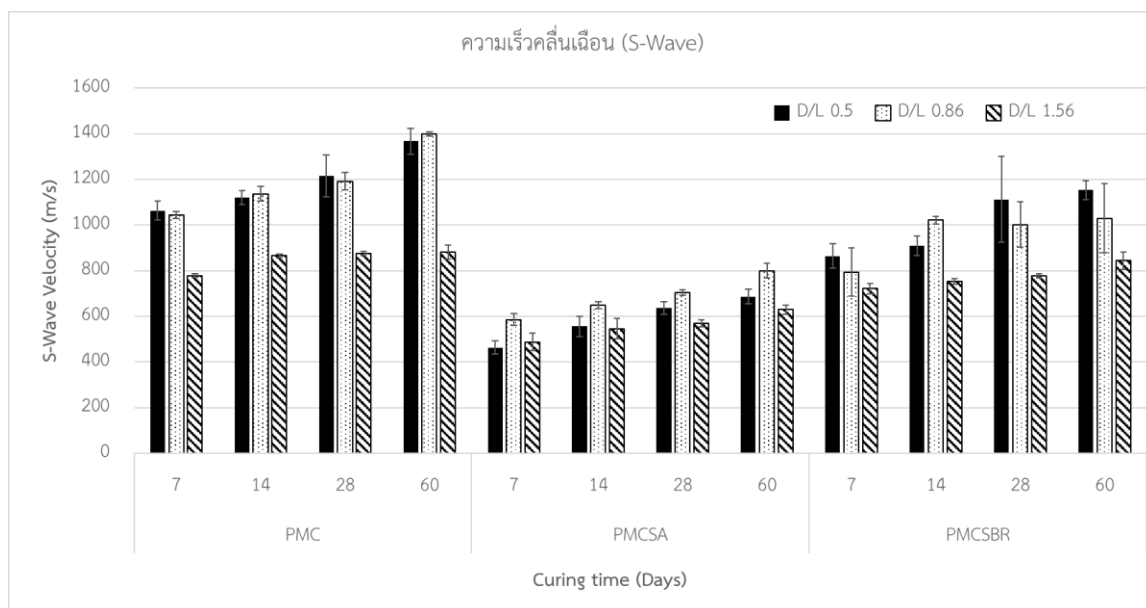
จากผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุงานทาง หินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (PMC), ซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA (PMCSA) และ ซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR (PMCSBR) พบว่าวัสดุ PMCSBR มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงกว่า วัสดุชนิด PMC และ PMCSA

4.3 ผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ FFR ที่ขนาดตัวอย่างแตกต่างกัน

ตามที่กล่าวมาในหัวข้อ 3.5 ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบ FFR ขนาด $D/L = 0.5$, $D/L = 0.86$ และ $D/L = 1.56$ ทั้ง 3 วัสดุเพื่อหาสมการในการเปรียบเทียบค่าการทดสอบให้ได้ตามมาตรฐาน ASTM C215 ที่ขนาดตัวอย่าง $D/L = 0.5$ โดยในงานวิจัยที่ผ่านมาของผู้วิจัย (Khunkud, 2022) พบว่า ค่าความเร็วคลื่นอัด (P-Wave) และ ค่าความเร็วคลื่นเฉือน (S-wave) ทั้งสองมีแนวโน้มเดียวกับในการพัฒนากำลังของกำลังอัดแกนเดียวและกำลังดึงทางอ้อมเช่นเดียวกับงานวิจัยอื่นๆที่ผ่านมา (Gowthaman et al., 2021) โดยในการทดสอบความสัมพันธ์ดังกล่าว ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่าความสัมพันธ์ของตัวอย่างแต่ละขนาดที่อายุบ่ม 7,14,28 และ 60 วัน



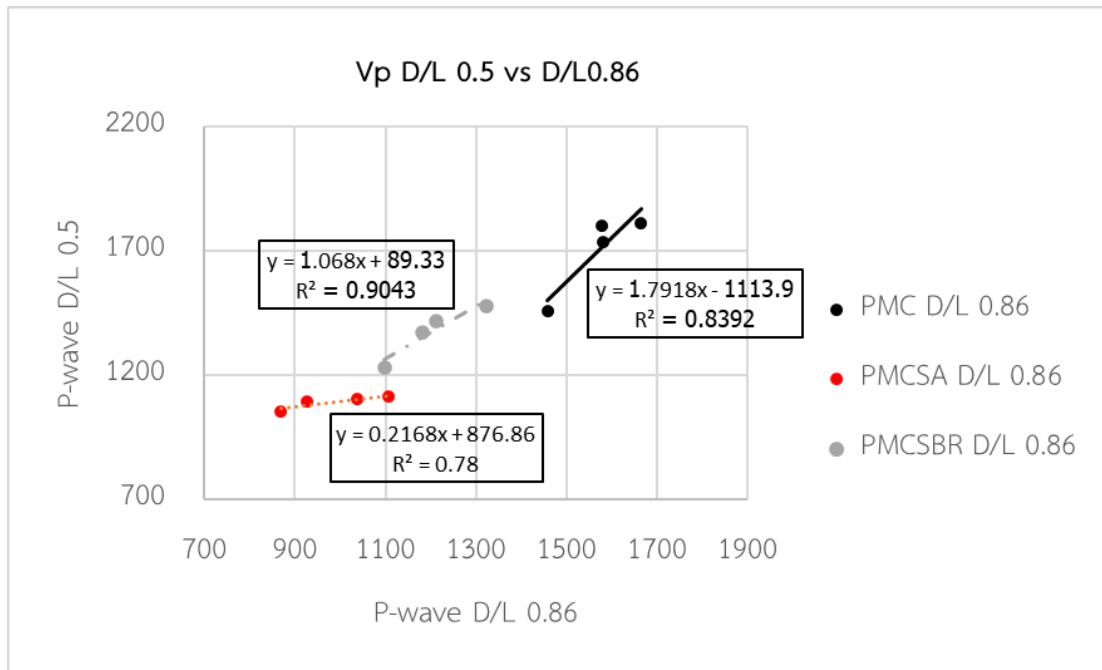
รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัด (P-Wave) และ อายุการบ่มของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้งสองชนิด



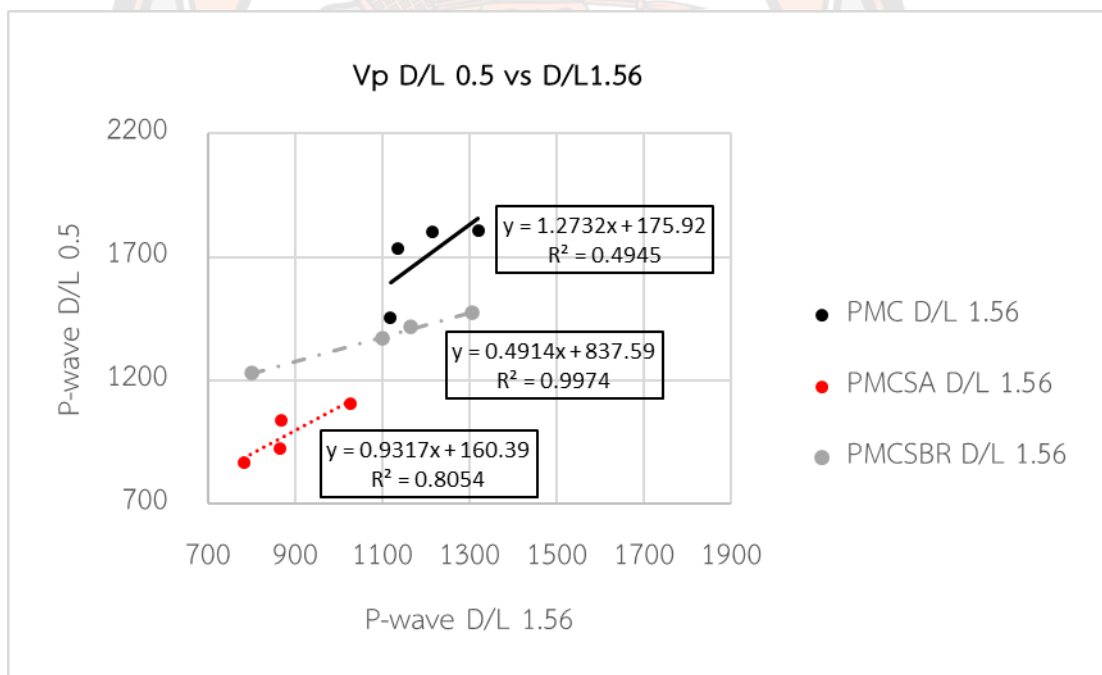
รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน (S-wave) และอายุการบ่มของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้งสองชนิด

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัดและความเร็วคลื่นเฉือน แสดงดังรูป 4-4,5 พบว่าค่าความเร็วคลื่นจะมีการพัฒนาเมื่ออายุการบ่มตัวอย่างมากขึ้นทั้ง 3 วัสดุ อย่างไรก็ตามขนาดอัตราส่วน D/L ของตัวอย่างจะส่งผลกระทบต่อค่าความเร็วคลื่น โดยอัตราส่วน D/L = 0.86 จะมีค่าความเร็วคลื่นที่ใกล้เคียงกับ อัตราส่วน D/L = 0.50 มากกว่า อัตราส่วน D/L = 1.56 ซึ่งเกิดจากผลกระทบของขนาดตัวอย่าง D/L

โดยหลังจากที่ทราบความสัมพันธ์ผู้วิจัยได้จัดทำการหาสมการเพื่อปรับแก้ค่าความเร็วคลื่นทั้งสองชนิดที่ขนาด D/L = 0.86 และ 1.56 ให้เป็นค่าความเร็วคลื่นที่มีอัตราส่วน D/L = 0.5



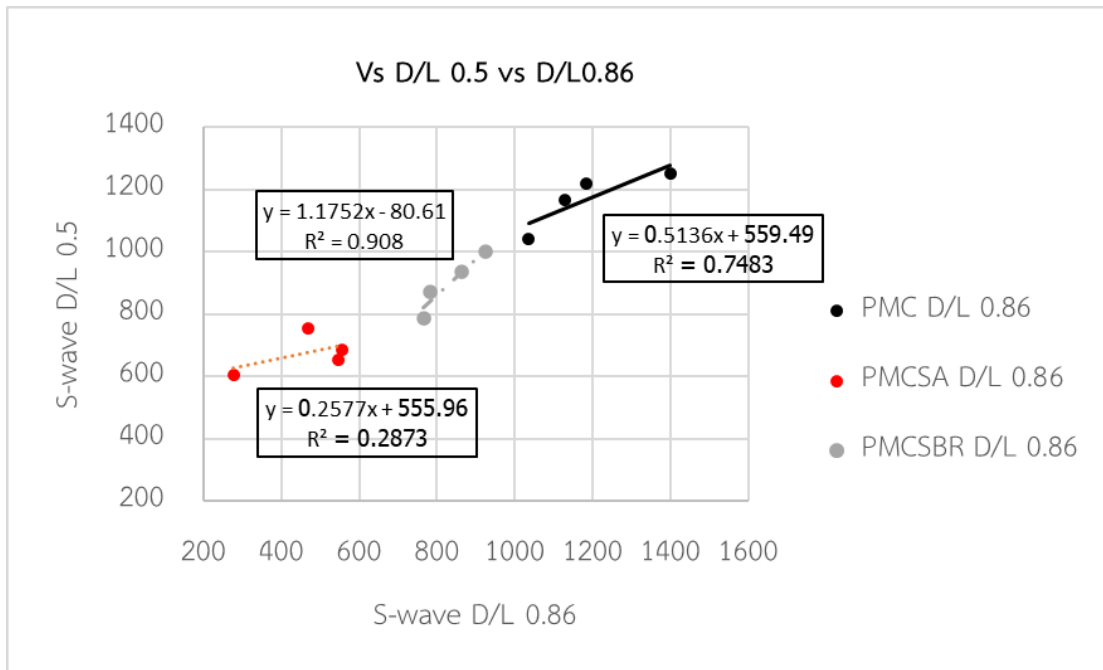
(a)



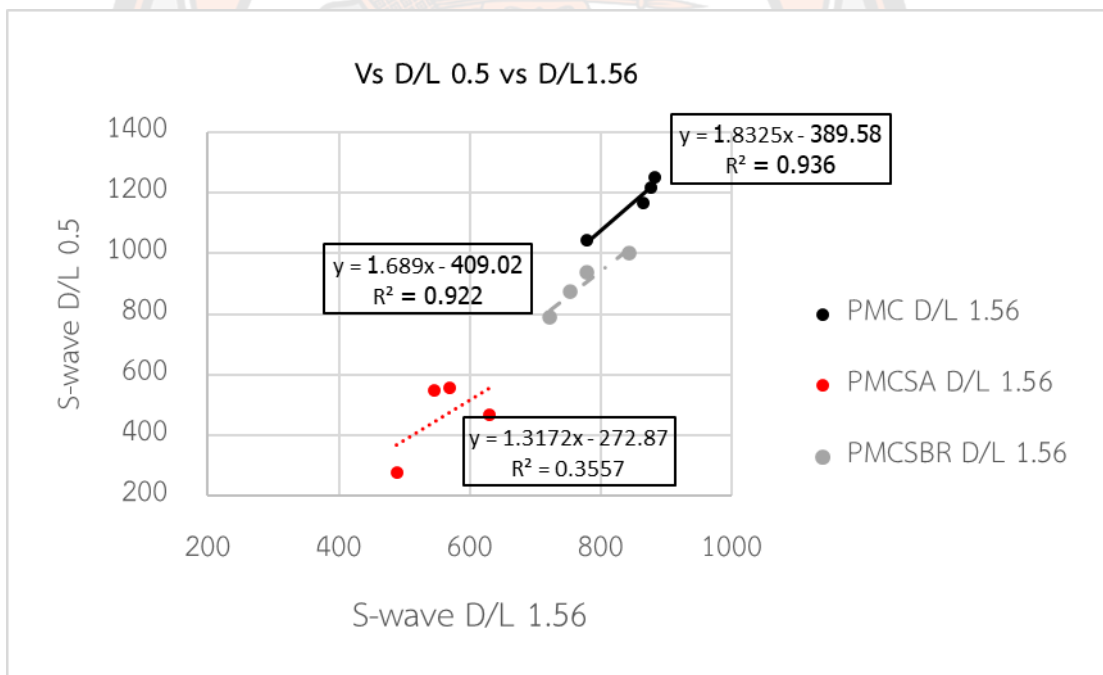
(b)

รูปที่ 4-6 กราฟแสดงสมการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นอัด (P-wave)

(a) สำหรับ D/L = 0.87 (b) สำหรับ D/L = 1.56



(a)



(b)

รูปที่ 4-7 กราฟแสดงสมการปรับเทียบค่าความเร็วคลื่นเฉือน (S-wave)

(a) สำหรับ D/L = 0.87 (b) สำหรับ D/L = 1.56

ตารางที่ 4-3 สรุปสมการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่น

Type		สมการเปรียบเทียบ	R^2	
P-wave	D/L 0.86	PMC	$1.7918x - 1113.9$	0.84
		PMCSA	$0.2168x + 876.86$	0.78
		PMCSBR	$1.068x + 89.33$	0.90
	D/L 1.56	PMC	$1.2732x + 175.92$	0.49
		PMCSA	$0.9317x + 160.39$	0.81
		PMCSBR	$0.4914x + 837.59$	1.00
S-wave	D/L 0.86	PMC	$0.5136x + 559.49$	0.75
		PMCSA	$0.2577x + 555.96$	0.29
		PMCSBR	$1.1752x - 80.61$	0.91
	D/L 1.56	PMC	$1.8325x - 389.58$	0.94
		PMCSA	$1.3172x - 272.87$	0.36
		PMCSBR	$1.689x - 409.02$	0.92

(X คือ ค่าความเร็วคลื่น)

จากผลการทดสอบข้างต้นจะได้สมการเพื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นของตัวอย่างขนาด $D/L = 0.87$ และ 1.56 เพื่อให้ได้ค่าความเร็วคลื่นที่อัตราส่วน $D/L = 0.5$

ทั้งนี้ผู้วิจัยจะใช้สมการดังกล่าวในการปรับแก้ค่าความเร็วคลื่นสำหรับการทดสอบหาค่าความเร็วคลื่นทั้งสองชนิดจากการทดสอบคลื่นสั้นสะท้อนด้วยวิธี FFR

4.4.4 ผลการศึกษาการจำลองการเสื่อมสภาพของวัสดุหินคลุกที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์และซีเมนต์พอลิเมอร์

โดยในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของวัสดุหินคลุกที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์และซีเมนต์พอลิเมอร์โดยได้ทำการจำลองการเสื่อมสภาพของวัสดุด้วยวิธี Wetting & Drying test (ASTM D559) ซึ่งเป็นวิธีที่ตอบสนองกับสภาพอากาศในประเทศไทยและเป็นที่ยอมรับในการศึกษาการเสื่อมสภาพของวัสดุในต่างประเทศ (Khoury & Zaman, 2007) โดยจะทำการทดสอบ Wetting&drying ก่อนทำการทดสอบ แบ่งเป็นการทดสอบดังต่อไปนี้

การทดสอบแบบทำลายตัวอย่าง

1. การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ที่ 0,3,6,9,12 cycle (อายุตัวอย่าง 7,13,19,25,31 วัน)
2. การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม ที่ 0,6,12 cycle (อายุตัวอย่าง 7,19,31 วัน)
3. การทดสอบความล้าของวัสดุ ที่ 0,6,12 cycle (อายุตัวอย่าง 7,19,31 วัน)

การทดสอบแบบทำลายตัวอย่าง

1. ตัวอย่างอัตราส่วน D/L = 0.86 ที่ 0,3,6,9,12 cycle (อายุตัวอย่าง 7,13,19,25,31 วัน)
2. ตัวอย่างอัตราส่วน D/L = 1.56 ที่ 0,6,12 cycle (อายุตัวอย่าง 7,19,31 วัน)

4.4.1. ผลการทดสอบการจำลองการเสื่อมสภาพของวัสดุโดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wetting&Drying)

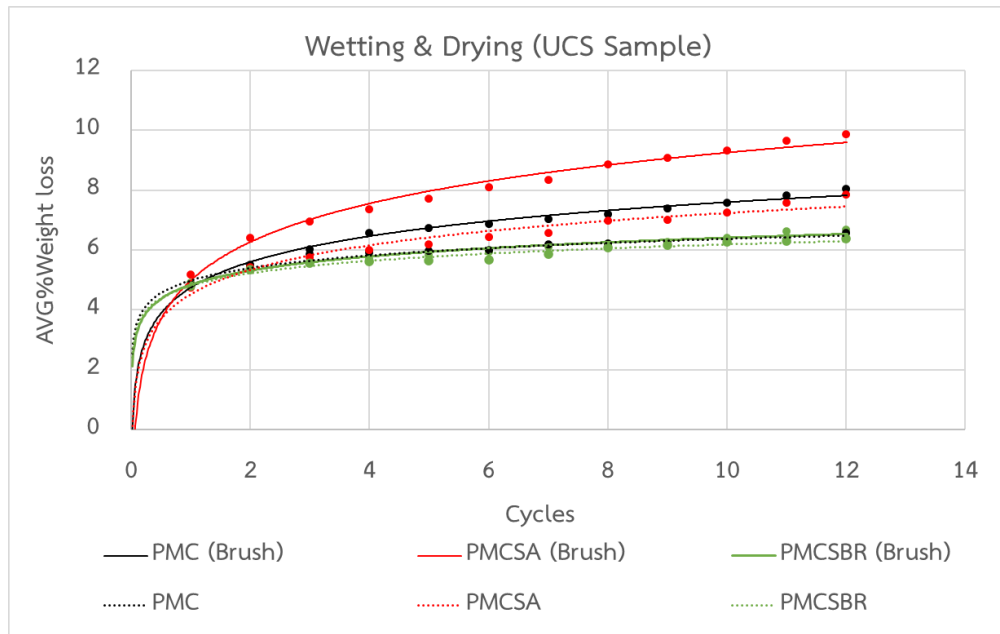
โดยในการทดสอบเปียกสลับแห้งผู้วิจัยได้ทำการทดสอบตัวอย่างทั้งหมด 2 ขนาด ได้แก่

1. ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว อัตราส่วน D/L =0.86 สำหรับตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

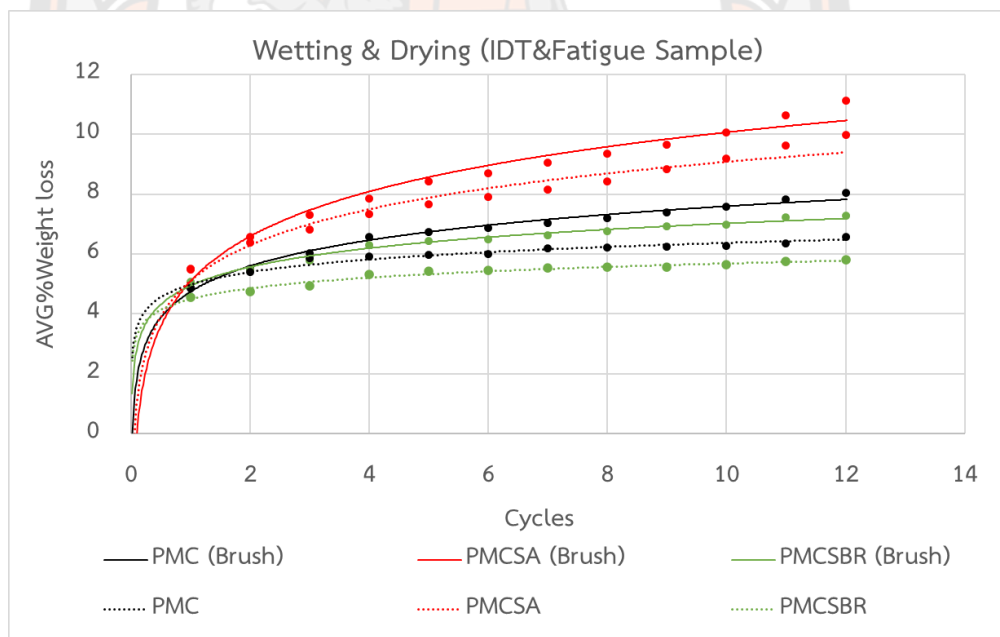
2. ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูงประมาณ 2.3 นิ้ว (70 เซนติเมตร) อัตราส่วน D/L = 1.56 สำหรับตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมและการทดสอบความคงทนต่อความล้าของวัสดุ (IDT Fatigue Test)



รูปที่ 4-8 ตัวอย่างที่การทดสอบโดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wetting&Drying)



รูปที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักและWetting & drying cycle ตัวอย่าง UCS



รูปที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักและWetting & drying cycle ตัวอย่าง IDT และ Fatigue Test

ผลการทดสอบการจำลองการเสื่อมสภาพของวัสดุโดยวิธีเปียกสลับแห้งทั้งกลุ่มตัวอย่าง UCS และกลุ่มตัวอย่าง IDT และ Fatigue Test รูปที่ 4-8 ถึง 4-10 นั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันแล้วจะพบว่าทั้งสองกลุ่มตัวอย่างจะให้ผลที่มีแนวโน้มเดียวกัน โดยวัสดุชนิด PMCSA แบบผ่านการขัด

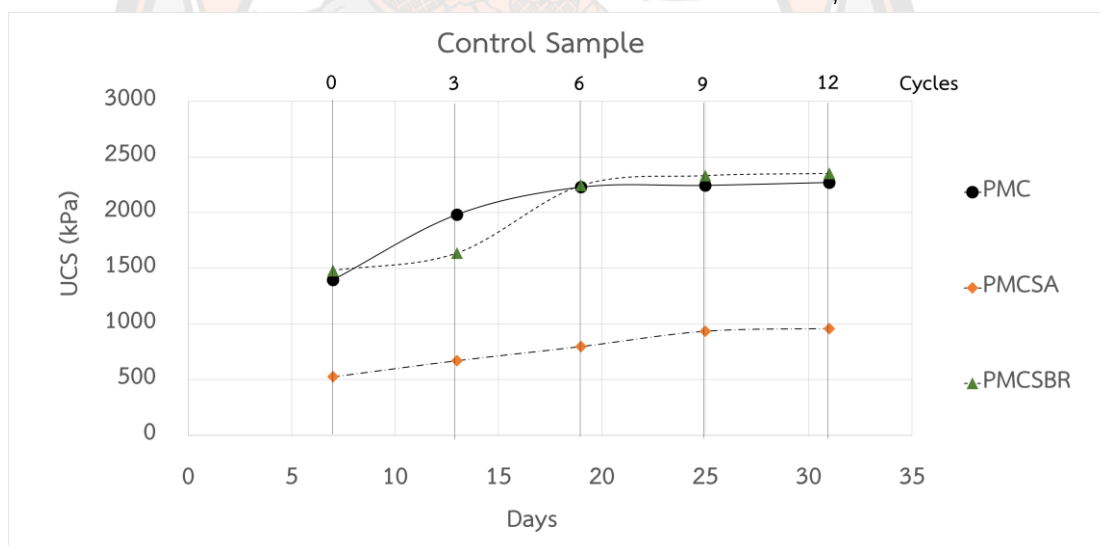
(PMCSA (Brush)) และแบบไม่ผ่านการขัด (PMCSA) โดยมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักอยู่ที่ ร้อยละ 9-10 ซึ่งมากกว่าวัสดุชนิด PMC แบบผ่านการขัด (PMC (Brush)) และแบบไม่ผ่านการขัด (PMC) ที่มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักอยู่ที่ประมาณร้อยละ 6-8 และวัสดุชนิด PMCSBR แบบผ่านการขัด (PMCSBR (Brush)) และแบบไม่ผ่านการขัด (PMCSBR) มีร้อยละการสูญเสียของวัสดุต่ำที่สุด ซึ่งร้อยละการสูญเสียน้ำหนักอยู่ที่ประมาณร้อยละ 5-6

4.4.2. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

ในการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวผู้วิจัยได้จัดกลุ่มตัวอย่างไว้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. ตัวอย่างควบคุม (Control) 2. ตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบไม่ผ่านการขัด (W&D) และ 3. ตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบผ่านการขัดผิวรอบตัวอย่าง (Brushed) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการรับกำลังอัดแกนเดียวของวัสดุที่แตกต่างกันทั้ง 3 วัสดุ

4.4.2.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวตัวอย่างควบคุม

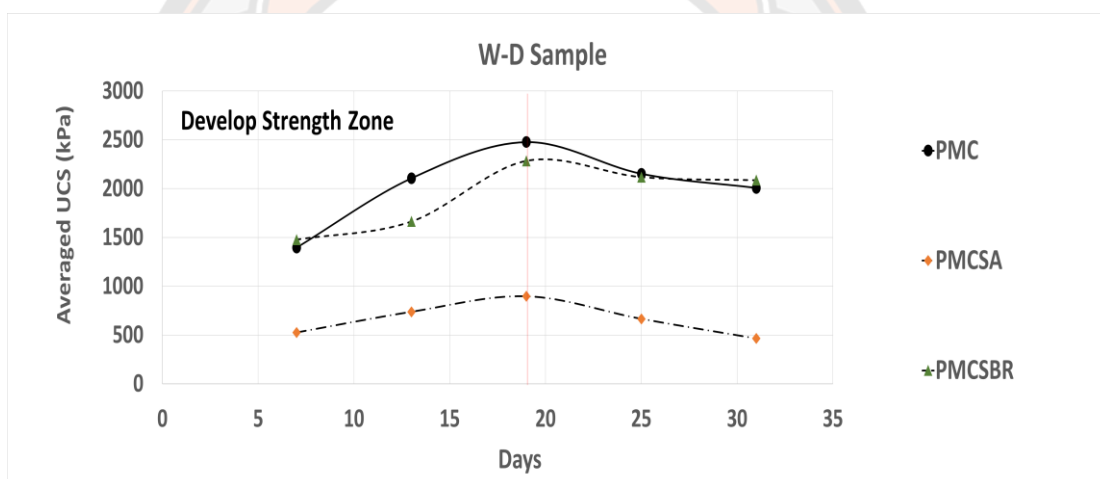


รูปที่ 4-11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวตัวอย่างควบคุม

จากรูป 4-11 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของกลุ่มตัวอย่างควบคุมนั้นจะเห็นว่า วัสดุ PMC จะมีการพัฒนากำลังในช่วง 0-6 Cycles (เทียบเท่ากับการบ่ม 7-19 วัน) หลังจากนั้นจะพบว่ากำลังของวัสดุจะเริ่มคงที่ เช่นเดียวกับวัสดุชนิด PMCSBR ในช่วงแรก 0-3 Cycles (7-13 วัน) วัสดุจะมีการพัฒนาค่อนข้างช้ากว่าวัสดุชนิด PMC แต่เมื่อผ่านไป ช่วง 3-6 Cycle (13-19 วัน) ได้มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นและเริ่มคงที่หลังจากครบ 6 Cycle (19 วัน) และวัสดุ PMCSA นั้น การพัฒนากำลังจะมีการหยุดพัฒนากำลังรับแรงอัด ช่วง 9 Cycle (25 วัน) จากนั้นกำลังจะเริ่มคงที่

โดยจะเห็นว่าวัสดุชนิด PMC และ PMCSBR นั้นการพัฒนากำลังจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยวัสดุชนิด PMC ในช่วงแรก 0-3 Cycles (7-13 วัน) จะมีกำลังรับแรงอัดแกนเดียวดีกว่าวัสดุชนิด PMCSBR แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึง 9-12 cycles (25-31 days) วัสดุชนิด PMCSBR จะมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวมากกว่าวัสดุชนิด PMC และวัสดุชนิด PMCSA กำลังรับแรงอัดแกนเดียวนั้นมีกำลังที่ต่ำกว่าสองวัสดุที่กล่าวมาและการพัฒนากำลังค่อนข้างต่ำ **ทั้งนี้สาเหตุหลักอาจเนื่องมาจาก พอลิเมอร์ชนิด SA มีความชื้นมากและเมื่อผสมกับน้ำในปริมาณที่น้อยกว่าสองวัสดุ อาจส่งผลให้เกิดปฏิกิริยา Hydration นั้นไม่สมบูรณ์** ซึ่งถ้าต้องการพิสูจน์สมมุติฐานนั้นนั้น ต้องมีการทดสอบเพิ่มเติมเช่น SEM, XRD เป็นต้น

4.4.2.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบไม่ผ่านการขัด (W&D)

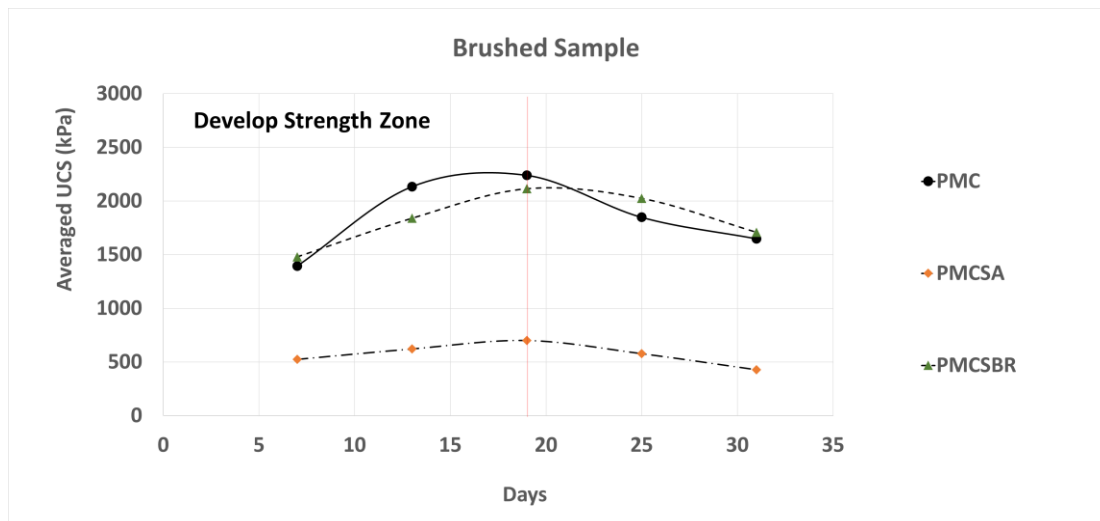


รูปที่ 4-12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบไม่ผ่านการขัด (W&D)

จากรูป 4-12 นั้นจะแสดงให้เห็นช่วงการพัฒนากำลังของตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบเปียกสลับแห้งแบบไม่ผ่านการขัดจะพบว่าทั้งสามวัสดุนั้นจะมีช่วงการพัฒนากำลังรับแรงอัดแกนเดียวในช่วง 0-6 Cycles (7-19 วัน) หลังจากนั้นกำลังรับแรงอัดแกนเดียวจะเริ่มลดลงเนื่องจากการเสื่อมสภาพของวัสดุที่ผ่านการทดสอบดังกล่าว

โดยกำลังของวัสดุในช่วง 0-6 Cycles (7-19 วัน) วัสดุ PMC จะมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สูงกว่าทุกวัสดุ และเมื่อถึงช่วง 6-12 Cycles (19-31 วัน) ซึ่งเป็นการเสื่อมสภาพของวัสดุ วัสดุ PMCSBR จะมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงกว่าวัสดุ ชนิด PMC และ PMCSA ซึ่งวัสดุ PMCSA นั้นมีกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ต่ำตั้งแต่ตัวอย่างควบคุม ส่งผลให้มีกำลังรับแรงอัดแกนเดียวน้อยสุด

4.4.2.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบผ่านการขัด (Brush)



รูปที่ 4-13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบผ่านการขัด (Brush)

จากรูป 4-13 นั้นแสดงให้เห็นช่วงการพัฒนา กำลังของตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบเปียกสลับแห้งแบบผ่านการขัด ทั้งสามวัสดุ นั้นจะมีช่วงการพัฒนา กำลังรับแรงอัดแกนเดียวในช่วง 0-6 Cycles (7-19 วัน) หลังจากนั้นในช่วง 6-9 Cycles (19-25 วัน) วัสดุชนิด PMC กำลังรับแรงอัดแกนเดียวจะลดลงเร็วกว่าวัสดุชนิด PMCSBR ซึ่งอาจเกิดจากพอลิเมอร์ชนิด SBR ช่วยในการชะลอการเสื่อมสภาพของวัสดุ

โดยกำลังของวัสดุในช่วง 0-6 Cycles (7-19 วัน) วัสดุ PMC จะมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สูงกว่าทุกวัสดุ แต่เมื่อวัสดุเริ่มเสื่อมสภาพช่วง 6-9 Cycles (19-25 วัน) ส่งผลให้ค่าของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุชนิด PMC ต่ำกว่าวัสดุชนิด PMCSBR และเช่นเดียวกับผลการทดสอบของตัวอย่าง W&D วัสดุชนิด PMCSA นั้นมีกำลังรับแรงอัดแกนเดียวยังคงมีค่าต่ำที่สุด

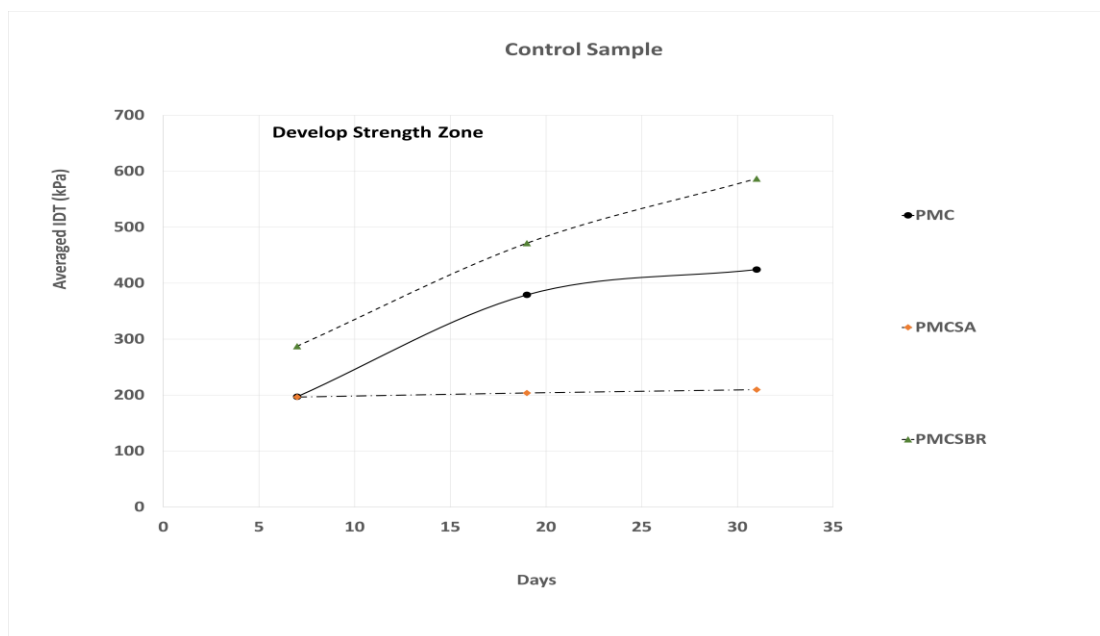
4.4.3. ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม

เช่นเดียวกับการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวในการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวผู้วิจัยได้จัดกลุ่มตัวอย่างไว้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. ตัวอย่างควบคุม (Control)
2. ตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบไม่ผ่านการขัด (W&D) และ
3. ตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบผ่านการขัดผิวรอบตัวอย่าง (Brush)

เพื่อประเมินประสิทธิภาพการรับกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุที่แตกต่างกันทั้ง 3 วัสดุ

4.4.3.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมตัวอย่างควบคุม

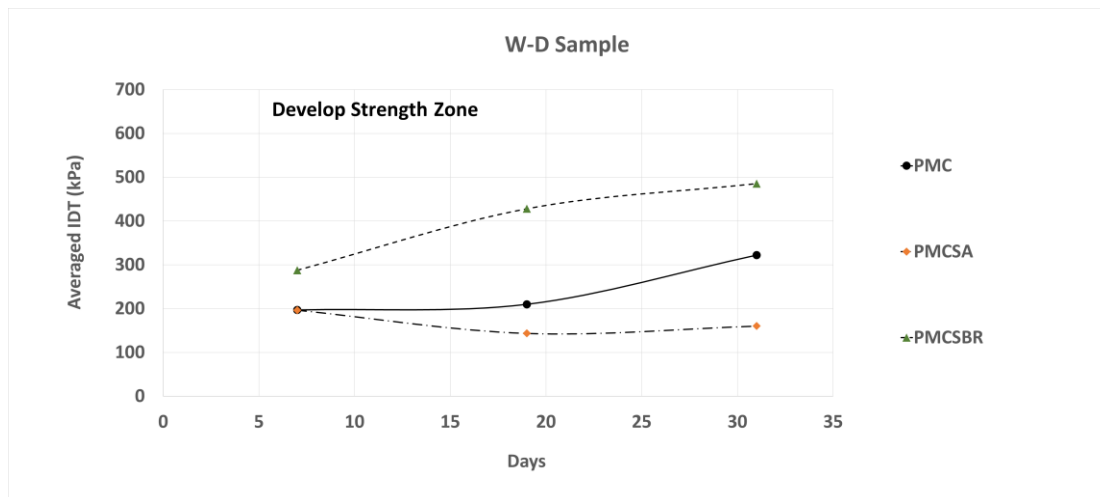


รูปที่ 4-14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมตัวอย่างควบคุม

จากรูปที่ 4-14 จะเห็นได้ว่าการพัฒนากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ PMCSBR ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR นั้นจะมีการพัฒนากำลังรับแรงดึงทางอ้อมเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ 287- 587 kPa ในถึงช่วง 0-12 Cycle (7-31 วัน) ซึ่งมีการพัฒนากำลังรับแรงดึงทางอ้อมได้ดีกว่าวัสดุชนิด PMC ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับการปรับด้วยซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ซึ่งมีช่วงอายุในการพัฒนากำลังดึงทางอ้อมอยู่ในช่วง 0-6 Cycles (7-19 วัน) 197-379 kPa และหลังจากนั้นค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมเริ่มคงที่สิ้นสุด 12 Cycle (31 วัน) อยู่ที่ 424 kPa และวัสดุ PMCSA ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ชนิด SA มีการพัฒนากำลังเพียงเล็กน้อย ตั้งแต่ 196 – 210 kPa ตั้งแต่ 0-12 Cycles (7-31 วัน)

เมื่อเปรียบเทียบด้านกำลังของแต่ละวัสดุจะพบว่า วัสดุ PMCSBR นั้นจะมีกำลังรับแรงดึงทางอ้อมสูงกว่าวัสดุชนิด PMC และวัสดุชนิด PMCSA มีค่ากำลังดึงทางอ้อมต่ำสุด ทั้งนี้สาเหตุหลักอาจเกิดจากข้อสันนิฐานเดียวกับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ซึ่งมีผลที่สอดคล้องกัน

4.4.3.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม ตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบไม่ผ่านการขัด (W-D)



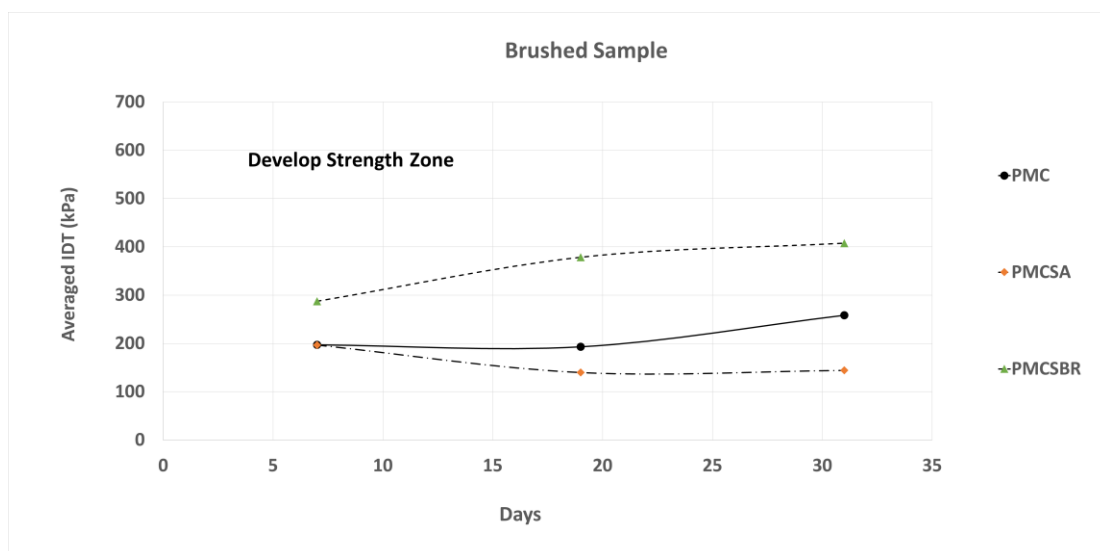
รูปที่ 4-15 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม

ตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบไม่ผ่านการขัด (W-D)

จากรูป 4-15 แสดงให้เห็นการพัฒนาต้านกำลังดึงทางอ้อมของทั้งสามวัสดุ ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่า วัสดุชนิด PMCSBR สามารถคงรูปแบบการพัฒนากำลังได้เหมือนกับตัวอย่างควบคุมรูปที่ 4-11 ซึ่งมีการพัฒนากำลังรับแรงดึงทางอ้อมในช่วง 0-12 Cycles (7-31 วัน) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 287-485 kPa โดยวัสดุชนิด PMC นั้น ในช่วง 0-6 Cycles (7-19 วัน) วัสดุมีการพัฒนาต้านกำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่ต่ำลงซึ่งเป็นผลกระทบของการทดสอบเปียกสลับแห้ง ทำให้มีค่าอยู่ระหว่าง 197-210 kPa แล้วถึงเริ่มมีการพัฒนากำลังรับแรงดึงทางอ้อมเพิ่มขึ้นในช่วง (19-31 วัน) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 210-322 kPa และวัสดุ PMCSA นั้นสามารถเห็นได้ชัดเลยว่าผลกระทบของการทดสอบเปียกสลับแห้งนั้นทำให้ค่ากำลังของวัสดุ PMCSA ลดลงจาก 196 ลงไป 144 kPa ในช่วง 0-12 Cycles (7-31 วัน)

เมื่อตัวอย่างทั้งสามวัสดุผ่านกระบวนการทดสอบเปียกสลับแห้งแบบไม่ขัดตัวอย่าง จะพบว่า วัสดุชนิด PMCSBR นั้นจะมีค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมสูงกว่าวัสดุชนิด PMC และ วัสดุ PMCSA

4.4.3.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม ตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบผ่านการขัด (Brush)



รูปที่ 4-16 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม

ตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบผ่านการขัด (Brush)

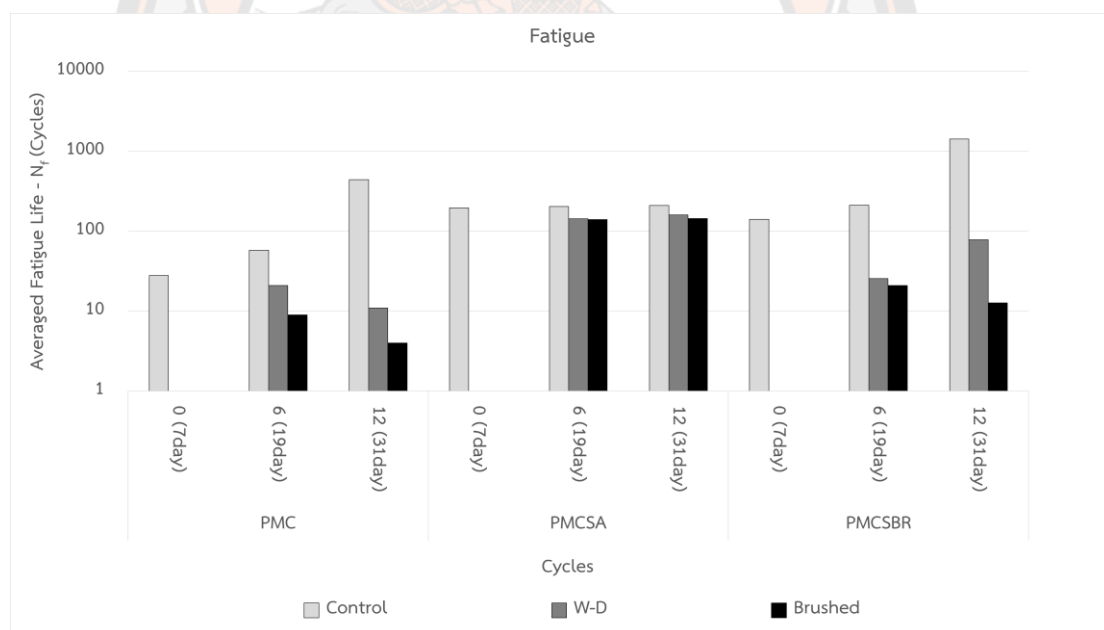
จากรูป 4-16 แสดงให้เห็นการพัฒนาต้านกำลังดึงทางอ้อมของทั้งสามวัสดุมีรูปแบบการพัฒนากำลังได้เหมือนกับตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบไม่ผ่านการขัด รูปที่ 4-12 ซึ่งวัสดุชนิด PMCSBR มีการพัฒนากำลังรับแรงดึงทางอ้อมในช่วง 0-12 Cycles (7-31 วัน) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 287-407 kPa โดยวัสดุชนิด PMC นั้น ในช่วง 0-6 Cycles (7-19วัน) วัสดุมีการพัฒนาต้านกำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่ต่ำลงซึ่งเป็นผลกระทบของการทดสอบเปียกสลับแห้ง ทำให้มีค่าอยู่ระหว่าง 197-192 kPa แล้วถึงเริ่มมีการพัฒนากำลังรับแรงดึงทางอ้อมเพิ่มขึ้นในช่วง (19-31วัน) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 192-258 kPa และวัสดุ PMCSA นั้นสามารถเห็นได้ชัดเจนว่าผลกระทบของการทดสอบเปียกสลับแห้งนั้นทำให้ค่ากำลังของวัสดุ PMCSA ลดลงจาก 196 ลงไป 144 kPa ในช่วง 0-12 Cycles (7-31 วัน)

โดยกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบผ่านการขัดจะเห็นว่าวัสดุชนิด PMCSBR มีกำลังดึงทางอ้อมที่สูงกว่าวัสดุชนิด PMC และวัสดุชนิด PMCSA

4.4.4. ผลการทดสอบความคงทนต่อความล้า (Fatigue) ของวัสดุงานทาง

การทดสอบความคงทนต่อความล้าในการศึกษานี้ถูกพัฒนาขึ้นการทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกร้าวเนื่องมาจากความล้า (Fatigue) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตตามมาตรฐาน EN 12697-24 โดยใช้ชุดทดสอบเดียวกับการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength Test) โดยตัวอย่างจะถูกให้แรงซ้ำๆจนเกิดการแตกร้าวของตัวอย่าง จำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำๆจะเป็นค่า Fatigue Life (N) ของก้อนตัวอย่าง

โดยในการศึกษานี้จะทำการกำหนดค่าแรงกระทำซ้ำๆที่ ร้อยละ 50 ของค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (IDT) โดยค่า Stress ที่แนะนำในการที่ใช้ในการทดสอบ คือ ร้อยละ 50 ถึง ร้อยละ 0.85 ของกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (PRC, 2005) และแช่โหลดค้างเป็นเวลา 2 นาทีก่อนทำการทดสอบ โดยในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทดสอบที่ ร้อยละ 70 ของกำลังรับแรงดึงทางอ้อมแต่ตัวอย่างเกิดการวิบัติตั้งแต่ให้แรงกระทำครั้งแรกผู้วิจัยจึงทำการลดค่า Stress โดยใช้ที่ร้อยละ 50 ของกำลังรับแรงดึงทางอ้อม



รูปที่ 4-17 ผลการทดสอบความคงทนต่อความล้า (Fatigue)

จากรูปที่ 4-17 พบว่าวัสดุ PMC เมื่ออายุตัวอย่างมากขึ้นจำนวน Life Cycles (N_f) ของการทดสอบ Fatigue ก็มากขึ้นเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามวัสดุแช่น้ำและวัสดุที่ผ่านการจำลองการเสื่อมสภาพค่า จำนวน Life Cycles ของการทดสอบ Fatigue มีค่าลดลง

วัสดุ PMCSA ผลการทดสอบพบว่า จำนวน Life Cycles (N_f) ของการทดสอบ Fatigue ตัวอย่างควบคุมมีค่าคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ UCS และ IDT ที่ว่าการปรับปรุงวัสดุด้วยพ

ลิเมอร์ชนิด SA ไม่สามารถเกิดการพัฒนากำลังของซีเมนต์ได้ โดยวัสดุแช่น้ำและวัสดุที่ผ่านการจำลองการเสื่อมสภาพค่า จำนวน Life Cycles ของการทดสอบ Fatigue ลดลงต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม

และวัสดุ PMCSBR พบว่า จำนวน Life Cycles (N_f) ของการทดสอบ Fatigue ของตัวอย่างควบคุมมีการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจน ถึง 12 Cycles (31 day) มีจำนวนมากที่สุดของทุกวัสดุ อย่างไรก็ตาม วัสดุแช่น้ำและวัสดุที่ผ่านการจำลองการเสื่อมสภาพค่า จำนวน Life Cycles (N_f) ของการทดสอบ Fatigue ลดลงต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมเนื่องจากอิทธิพลของการทดสอบการจำลองการเสื่อมสภาพของวัสดุ

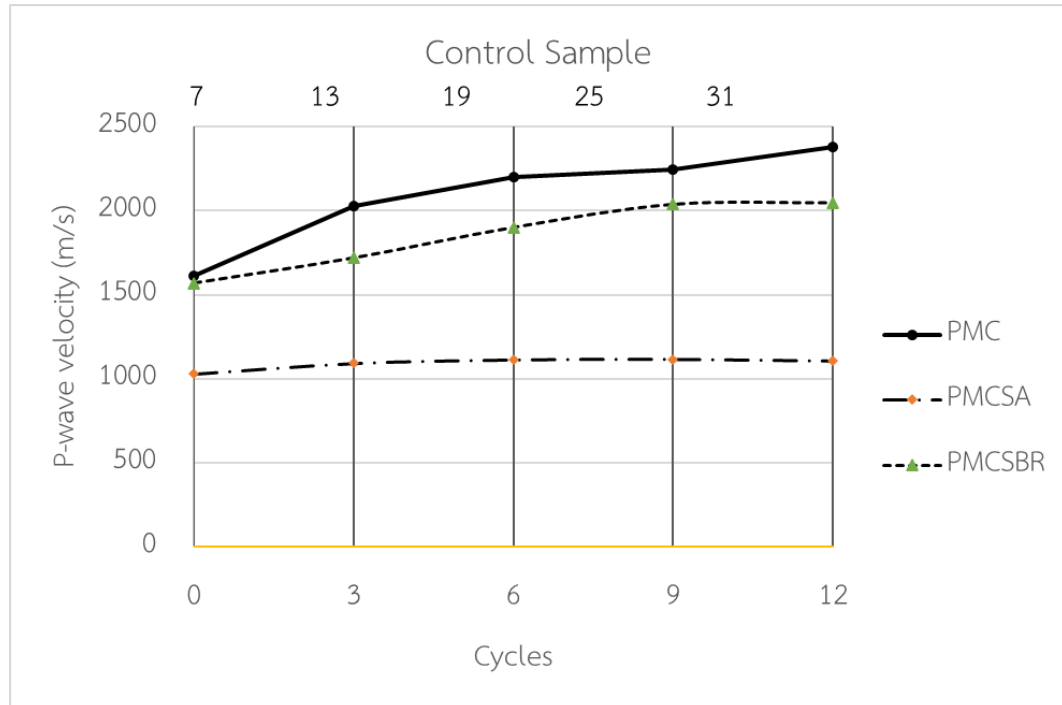
และจากรูป 4-17 จะพบว่า Fatigue life ของตัวอย่าง SA นั้นเกือบคงที่ตลอดระยะเวลาการบ่ม จุดนี้อาจกล่าวได้ว่าการใช้พอลิเมอร์ชนิด SA อาจไม่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุ และยังไม่สามารถช่วยปรับปรุงเรื่องกำลังรับแรงของวัสดุได้

4.4.5 ผลการทดสอบ Seismic Modulus Test โดยวิธี Free-Free Resonance: FFR

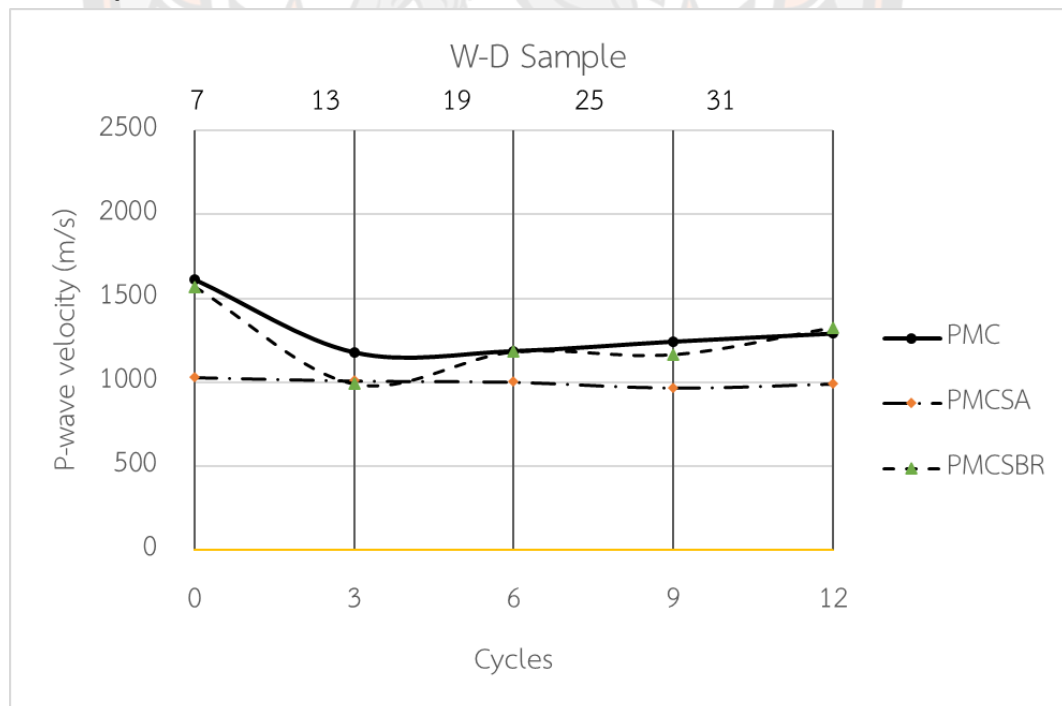
การทดสอบ Free-Free Resonance (FFR) เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายก่อนตัวอย่างโดยในงานศึกษานี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบ 2 รูปแบบ ได้แก่ Longitudinal เพื่อหาค่าความเร็วคลื่นอัด (P-Wave) และ Torsional เพื่อหาค่าความเร็วคลื่นเฉือน (S-Wave)

โดยตัวอย่างที่ทำการทดสอบจะแบ่งเป็น 3 กลุ่มเช่นเดียวกับการทดสอบก่อนหน้านี้ ก่อนทดสอบตัวอย่างจะถูกแช่น้ำเพื่อให้ตัวอย่างอิ่มตัวผิวแห้ง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.4.5.1 ผลการทดสอบความเร็วคลื่นอัด (P-Wave Velocity) โดยวิธี Free-Free Resonance

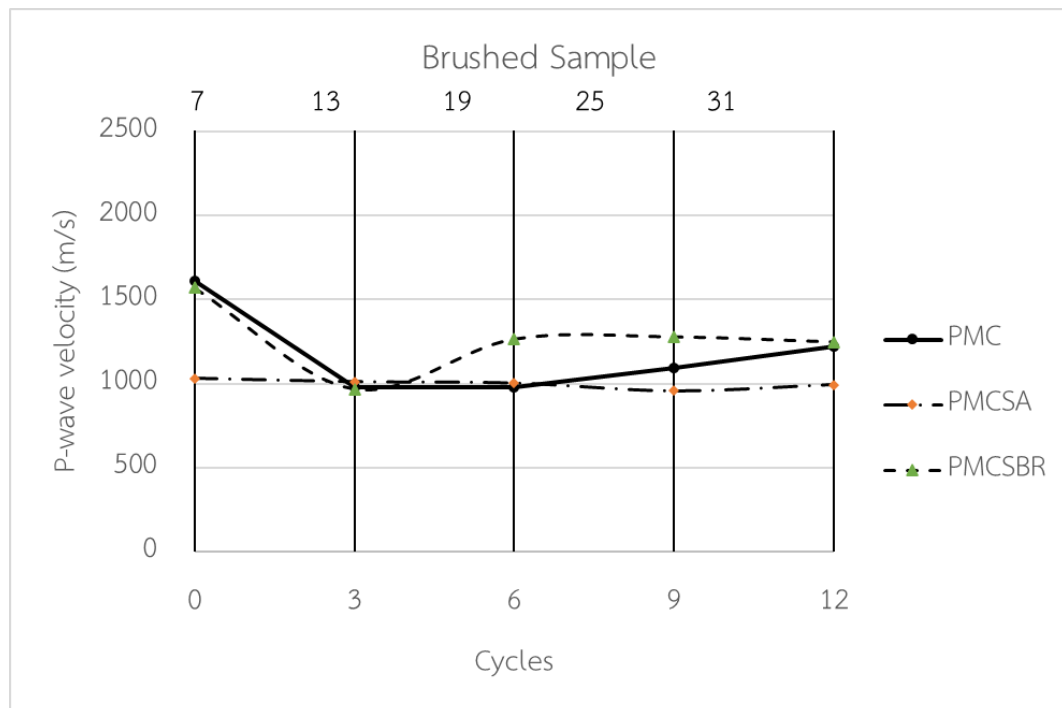


รูปที่ 4-18 ผลการทดสอบ P-Wave Velocity ตัวอย่างควบคุม (ตัวอย่าง UCS)



รูปที่ 4-19 ผลการทดสอบ P-Wave Velocity

ตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบไม่ผ่านการขัด (W-D) (ตัวอย่าง UCS)



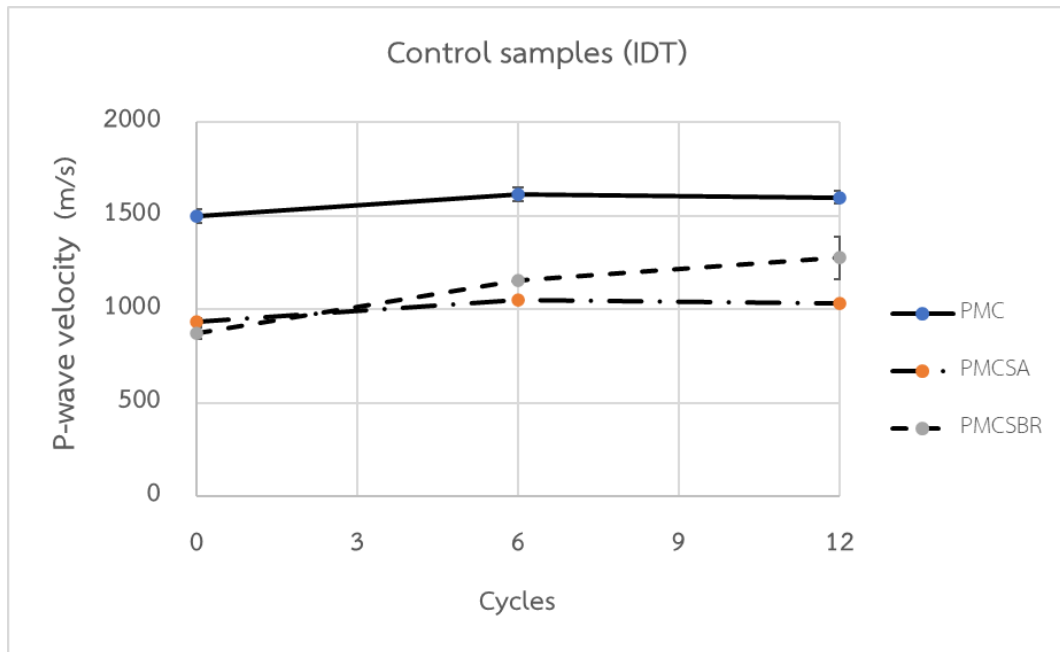
รูปที่ 4-20 ผลการทดสอบ P-Wave Velocity

ตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลั้บแห้งแบบผ่านการขัด (Brushed) (ตัวอย่าง UCS)

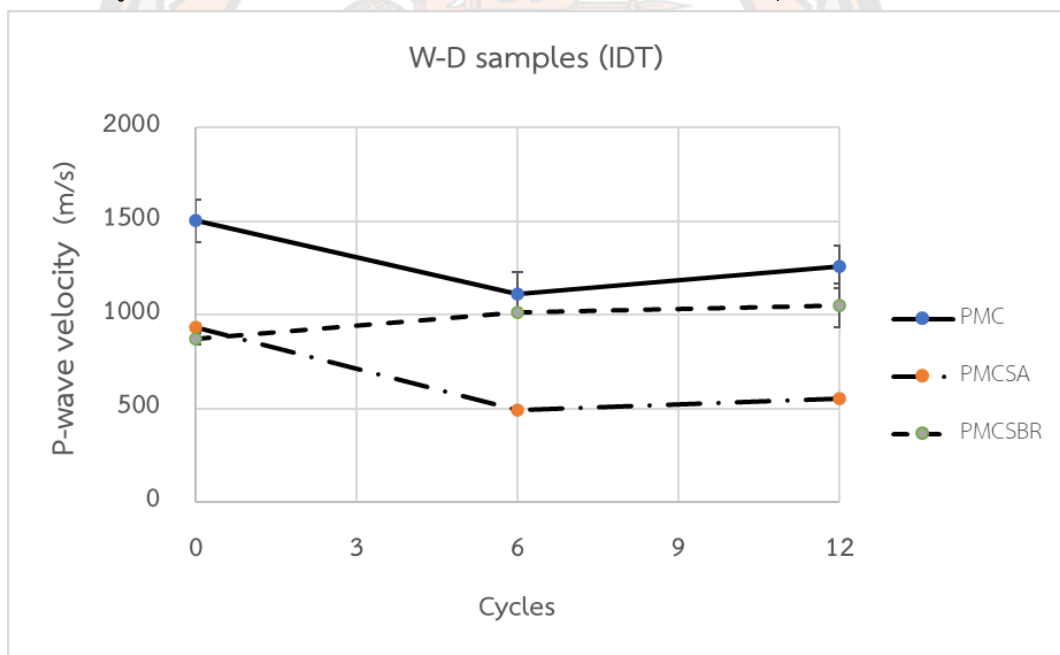
จากรูปที่ 4-18 แสดงผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่น P-wave ของกลุ่มตัวอย่างควบคุมจะเห็นได้ว่า วัสดุชนิด PMC จะมีการพัฒนาค่าความเร็วคลื่น P-wave ในช่วงอายุการบ่ม 0-6 Cycles (7-19 วัน) และหลังจากนั้นจะเริ่มให้ค่าที่คงที่ ในส่วนของวัสดุชนิด PMCSBR นั้นวัสดุจะมีการพัฒนาค่าความเร็วคลื่น P-wave จะอยู่ในช่วงอายุบ่ม 0-9 Cycles (0-25 วัน) และวัสดุชนิด PMCSA จะมีค่าค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ Cycle ที่ 0 หรือตัวอย่างมีอายุบ่มครบ 7 วัน

จากรูปที่ 4-19,20 จะสังเกตเห็นได้ว่า ค่าความเร็วคลื่น P-wave ของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการ W-D และ กลุ่มตัวอย่าง Brushed ของวัสดุ PMC และ PMCSBR จะส่งผลให้ค่าความเร็วคลื่น P-wave ลดลงในช่วง 0-3 Cycles (7-13 วัน) แต่จะมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นในช่วง 3-6 Cycles (13-19 วัน) และเริ่มคงที่หลังจาก 6 Cycles อย่างไรก็ตามผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุชนิด PMCSA หลังผ่านกระบวนการ W-D และ Brushed จะทำให้ค่าต่ำกว่ากลุ่มตัวอย่าง Control เล็กน้อยแต่ยังคงให้ค่า P-wave ที่คงที่ตั้งแต่ 0-12 Cycles (7-31 วัน)

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการ W-D และ Brushed จะส่งผลให้ค่าความเร็วคลื่น P-wave ลดลง โดยวัสดุ PMC ลดลง ประมาณร้อยละ 20 และ 24 ตามลำดับ PMCSBR ลดลงร้อยละ 16 และ 21 ตามลำดับ และ PMCSA ลดลงร้อยละ 3 และ 4 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามวัสดุชนิด PMCSA ก็ยังให้ค่าที่ต่ำกว่า 2 วัสดุ อันเนื่องมาจากสมมุติฐานว่า Polymer ชนิด SA ไปยับยั้งการพัฒนาด้านความแข็งแรงของตัวอย่าง

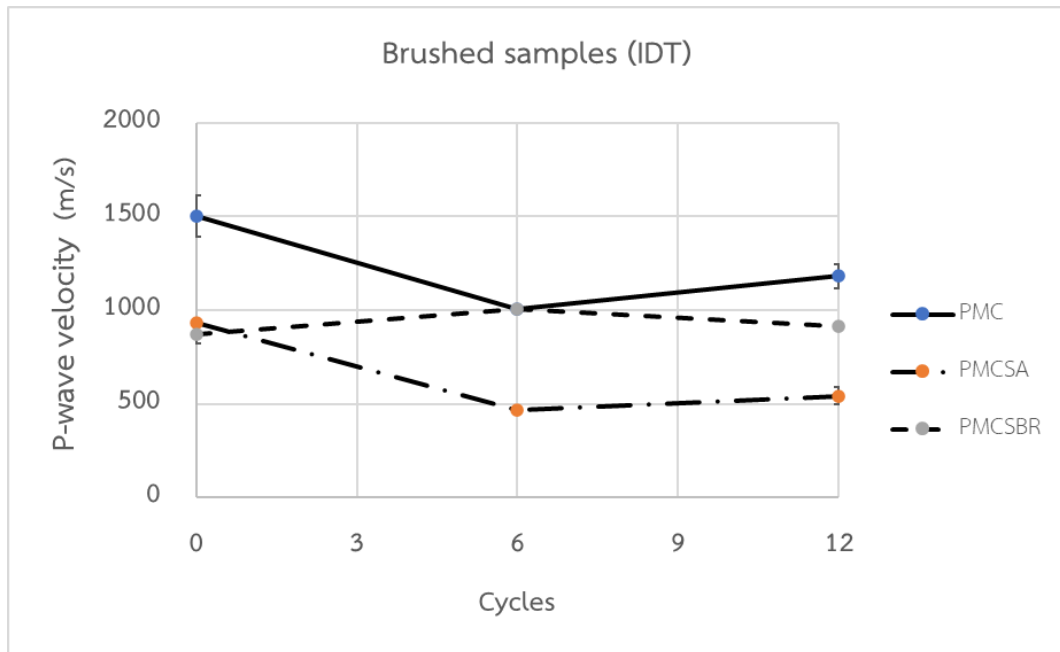


รูปที่ 4-21 ผลการทดสอบ P-Wave Velocity ตัวอย่างควบคุม (ตัวอย่าง IDT)

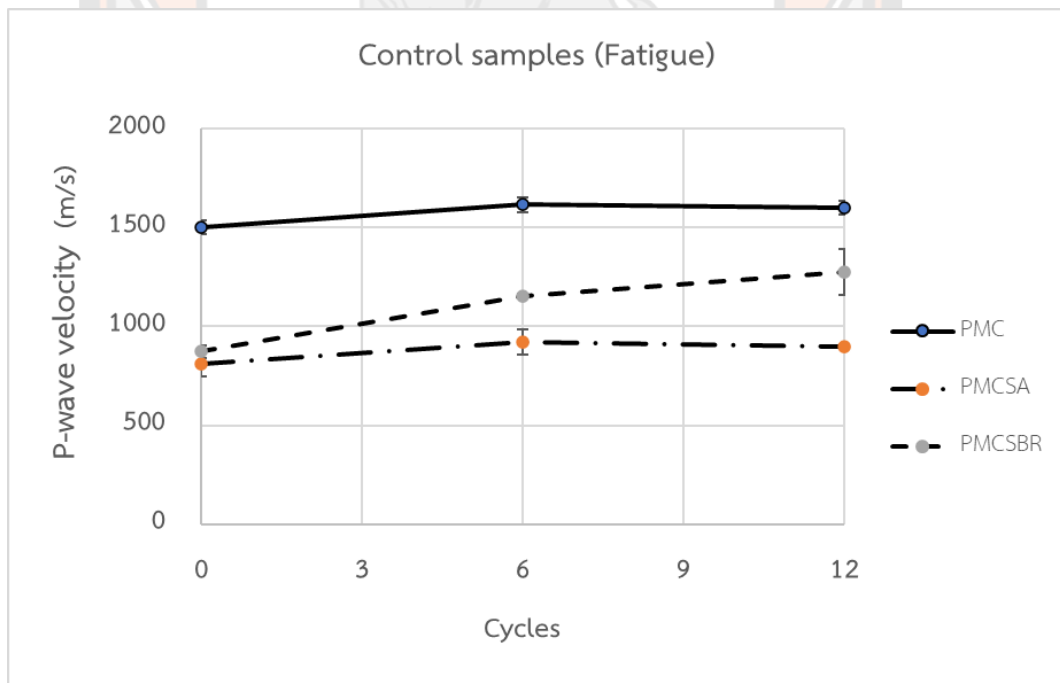


รูปที่ 4-22 ผลการทดสอบ P-Wave Velocity

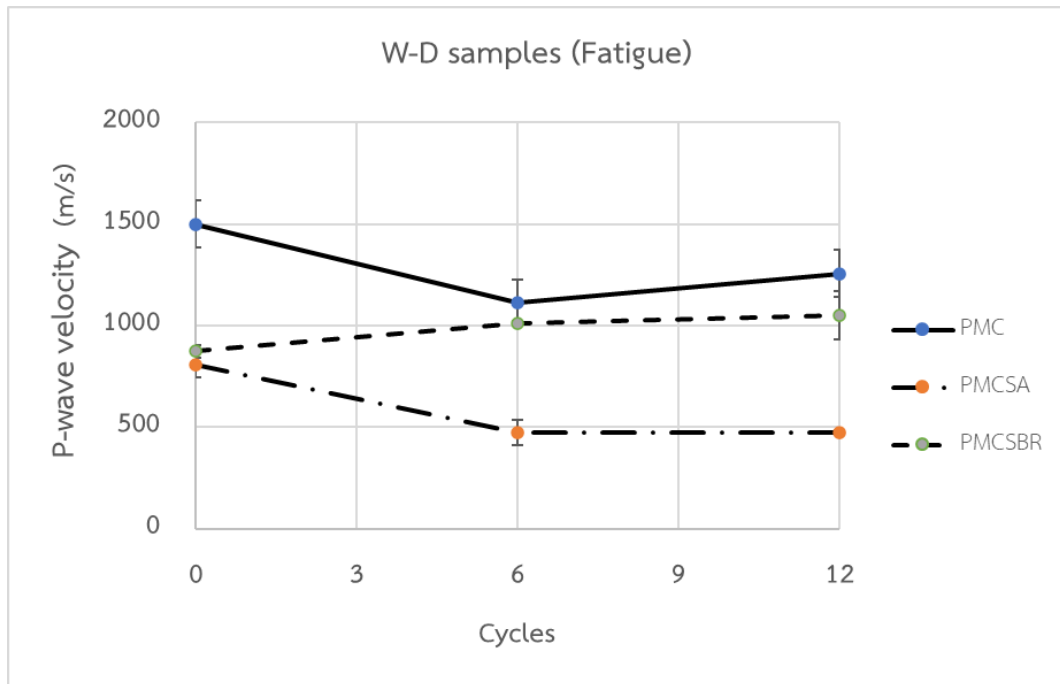
ตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบไม่ผ่านการขัด (W-D) (ตัวอย่าง IDT)



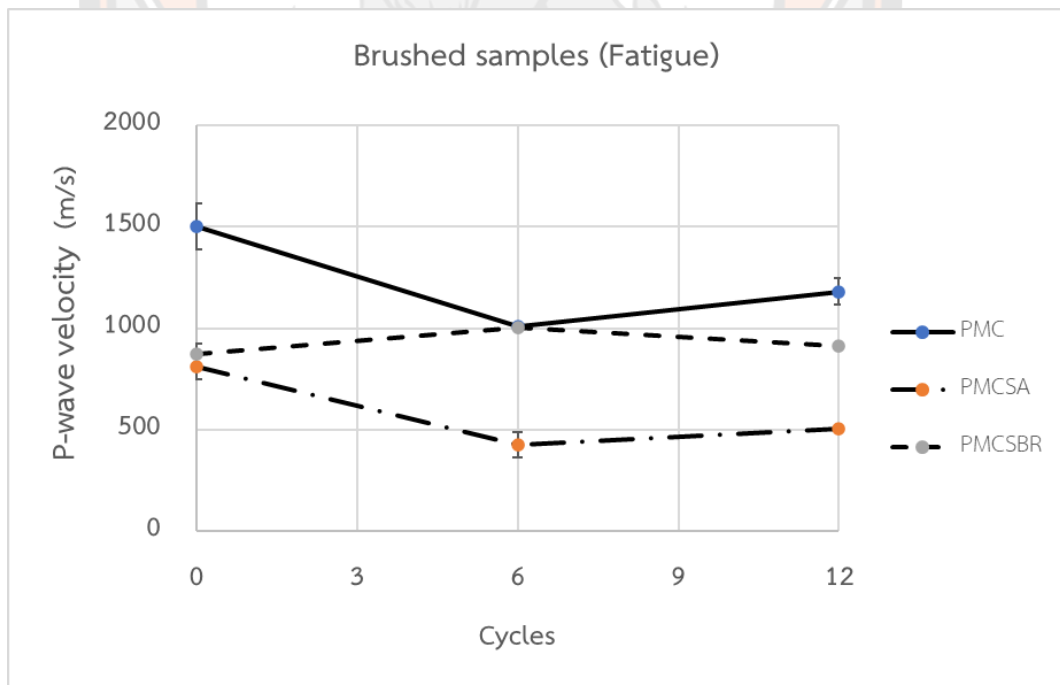
รูปที่ 4-23 ผลการทดสอบ P-Wave Velocity ตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบผ่านการขัด (W-D) (ตัวอย่าง IDT)



รูปที่ 4-24 ผลการทดสอบ P-Wave Velocity ตัวอย่างควบคุม (ตัวอย่าง Fatigue)



รูปที่ 4-25 ผลการทดสอบ P-Wave Velocity
ตัวอย่างผ่านกระบวนการเป็ยกสลับแห้งแบบไม่ผ่านการขัด (W-D) (ตัวอย่าง Fatigue)



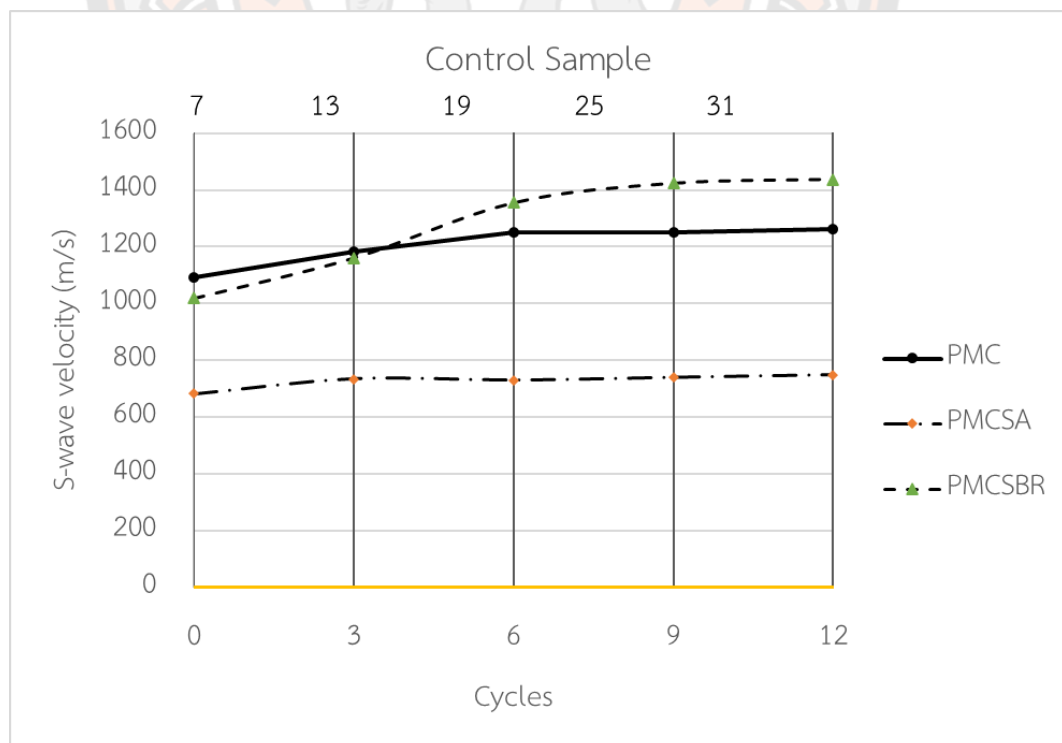
รูปที่ 4-26 ผลการทดสอบ P-Wave Velocity
ตัวอย่างผ่านกระบวนการเป็ยกสลับแห้งแบบผ่านการขัด (W-D) (ตัวอย่าง Fatigue)

จากรูป 4-21,26 แสดงค่าความเร็วคลื่น P-wave ของตัวอย่างขนาด D/L 1.56 หรือตัวอย่างที่จะถูกนำไปทำการทดสอบ IDT และ Fatigue ซึ่งให้ค่าที่ไปในทิศทางเดียวกันและมีผลที่ใกล้เคียงกัน ค่าที่แสดงข้างต้นเป็นค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง

โดยในกลุ่มตัวอย่าง Control รูปที่ 4-21 และ 4-24 ค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุชนิด PMC จะให้ค่าสูงสุดและค่อนข้างที่จะคงที่โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1500 ถึง 1600 m/s คิดเป็นร้อยละ 6 ซึ่งมีการพัฒนาความเร็วคลื่นเพียงเล็กน้อย โดยวัสดุชนิด PMCSBR จะมีการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆตั้งแต่ 0-12 Cycles โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 874 ถึง 1280 m/s คิดเป็นร้อยละ 31 วัสดุชนิด PMCSA ยังคงให้ค่าที่ต่ำที่สุดมีการพัฒนาความเร็วคลื่น P-wave เพียงเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 930 ถึง 1035 m/s คิดเป็นร้อยละ 9

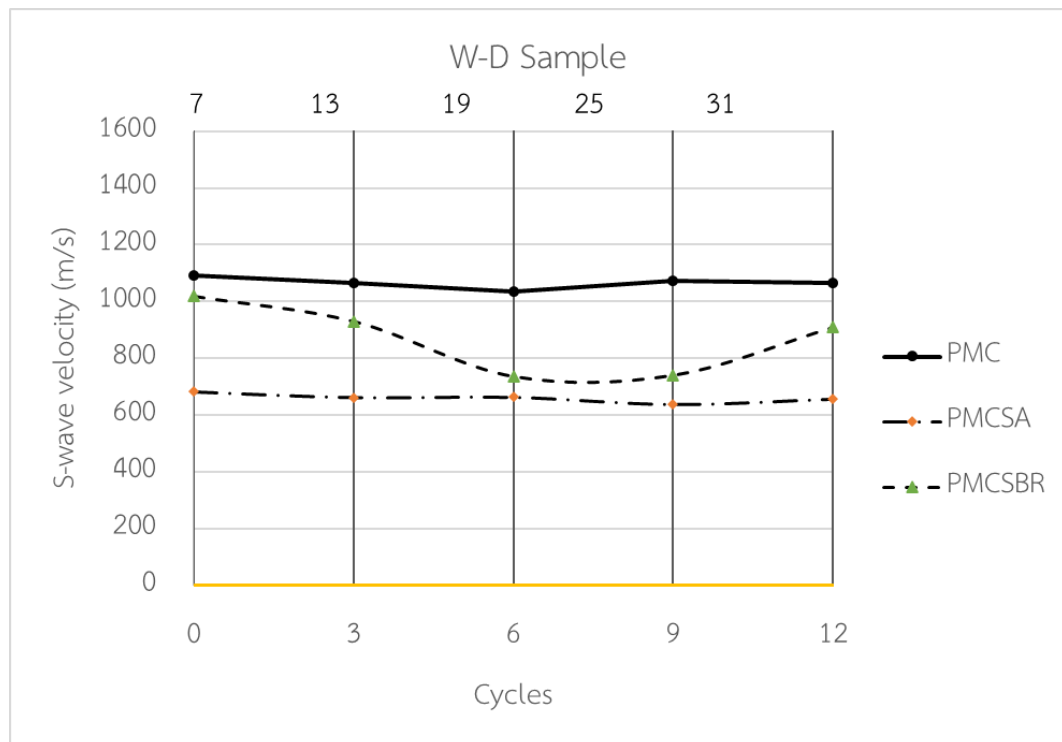
สำหรับกลุ่มตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบไม่ผ่านการขัดสี (W-D) และ แบบผ่านการขัด (Brushed) ค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุชนิด PMC และ PMCSA จะลดลงเมื่อตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้ง โดย PMC จะมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 21 ส่วนวัสดุ PMCSA ลดลงร้อยละ 41 ส่วนวัสดุชนิด PMCSBR จะมีค่าเพิ่มร้อยละ 4

4.4.5.2 ผลการทดสอบความเร็วคลื่นเฉือน (S-Wave Velocity) โดยวิธี Free-Free Resonance



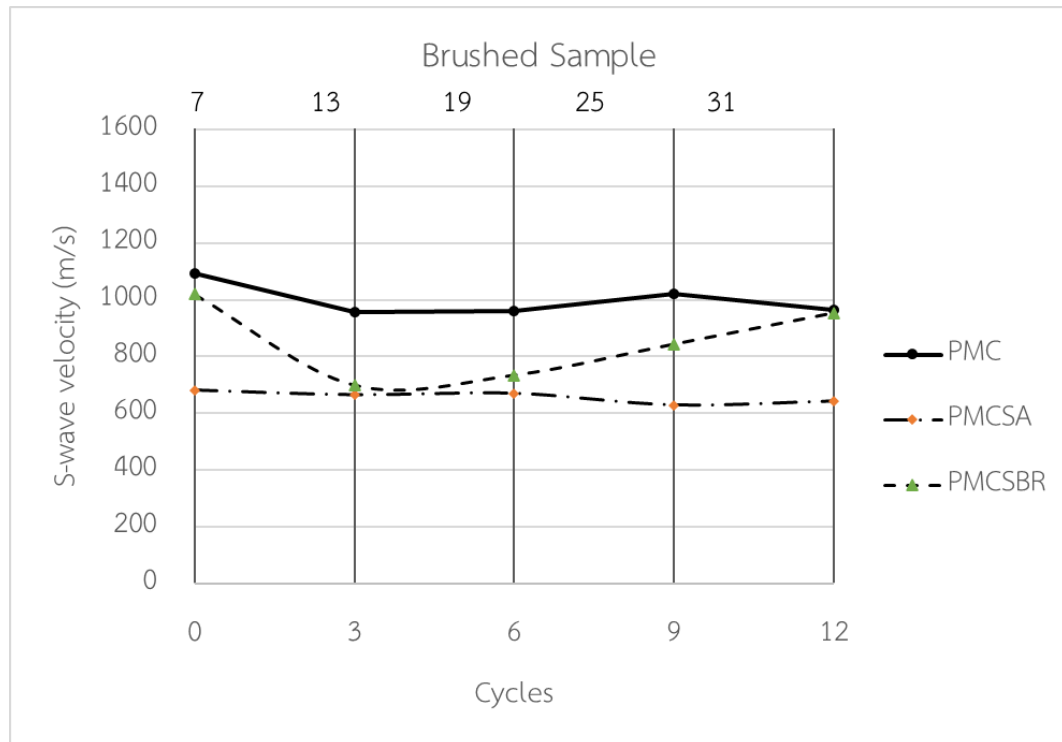
รูปที่ 4-27 ผลการทดสอบ S-Wave Velocity ตัวอย่างควบคุม(ตัวอย่าง UCS)

จากรูปที่ 4-27 แสดงผลการทดสอบ ค่าความเร็วคลื่น S-wave จะสังเกตเห็นได้ว่า วัสดุชนิด PMCSBR จะให้ค่าความเร็วคลื่นสูงที่สุดเมื่อครบอายุการบ่ม 31 วัน โดยมีการพัฒนาค่าความเร็วคลื่นในช่วง 0-6 Cycles (7-19 วัน) จากนั้นค่าความเร็วคลื่น S-wave จะเริ่มคงที่จนถึง 12 Cycles (31 วัน) โดยวัสดุชนิด PMC จะให้กำลังที่ต่ำกว่าเล็กน้อยแต่ยังมีการพัฒนากำลังในช่วงเวลาเดียวกับ วัสดุชนิด PMCSBR และวัสดุชนิด PMCSA ผลยังสอดคล้องกับทุกการทดสอบที่ผ่านมาคือไม่มีการพัฒนาในแต่ละการทดสอบ



รูปที่ 4-28 ผลการทดสอบ S-Wave Velocity

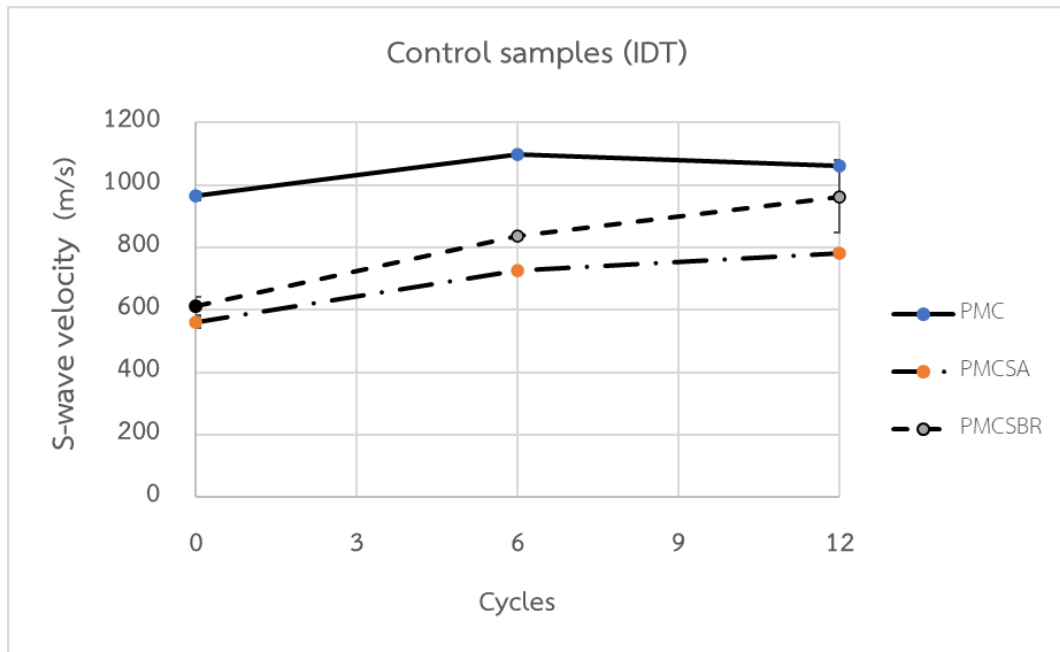
ตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบไม่ผ่านการขัด (W-D) (ตัวอย่าง UCS)



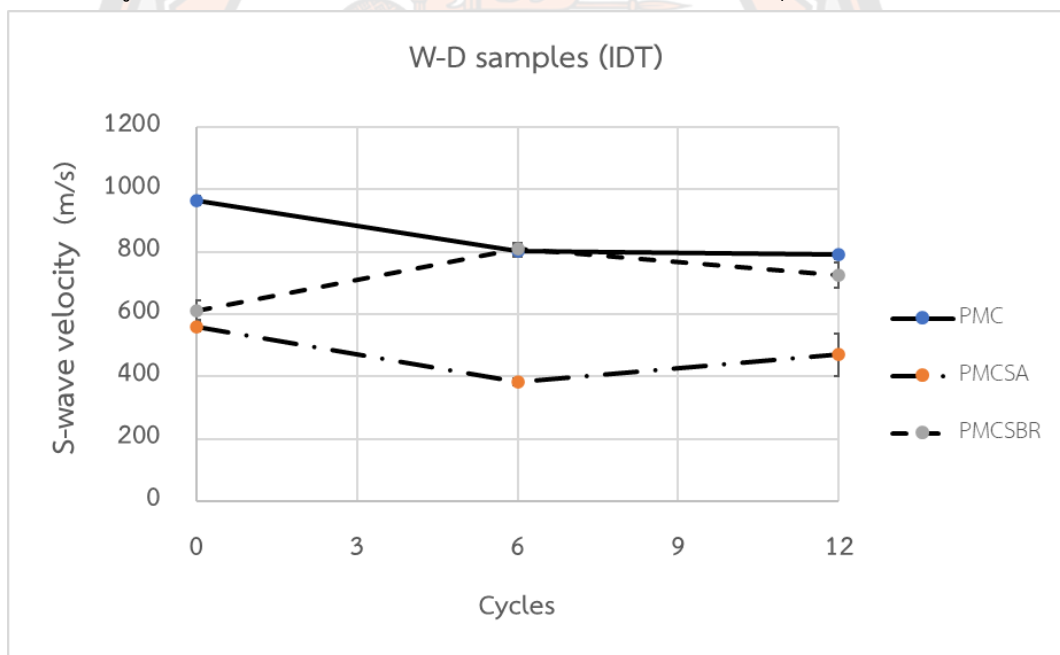
รูปที่ 4-29 ผลการทดสอบ S-Wave Velocity

ตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบผ่านการขัด (Brushed) (ตัวอย่าง UCS)

จากรูปที่ 4-28,29 แสดงผลการทดสอบหาค่าความเร็วคลื่น S-wave จะพบว่าผลการทดสอบค่อนข้างที่จะไม่ตอบสนองกับผลการทดสอบ UCS ซึ่งอาจเกิดจากความแปรปรวนของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้ง อย่างไรก็ตามผลการทดสอบก็แสดงให้เห็นว่าวัสดุชนิด PMCSA ยังคงให้ค่าที่ค่อนข้างคงที่

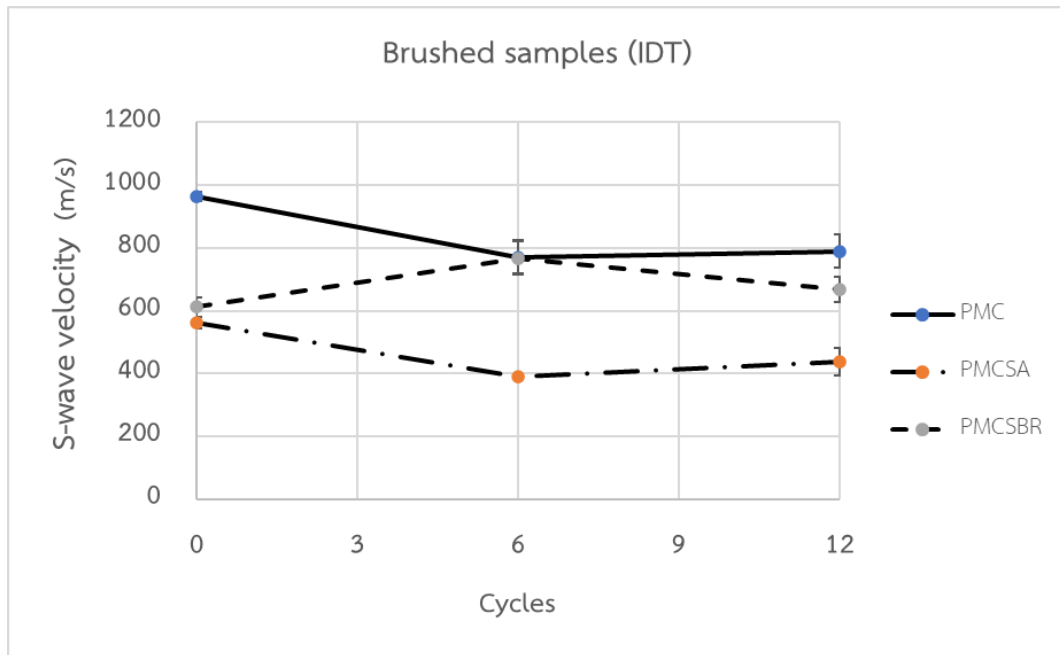


รูปที่ 4-30 ผลการทดสอบ S-Wave Velocity ตัวอย่างควบคุม(ตัวอย่าง IDT)

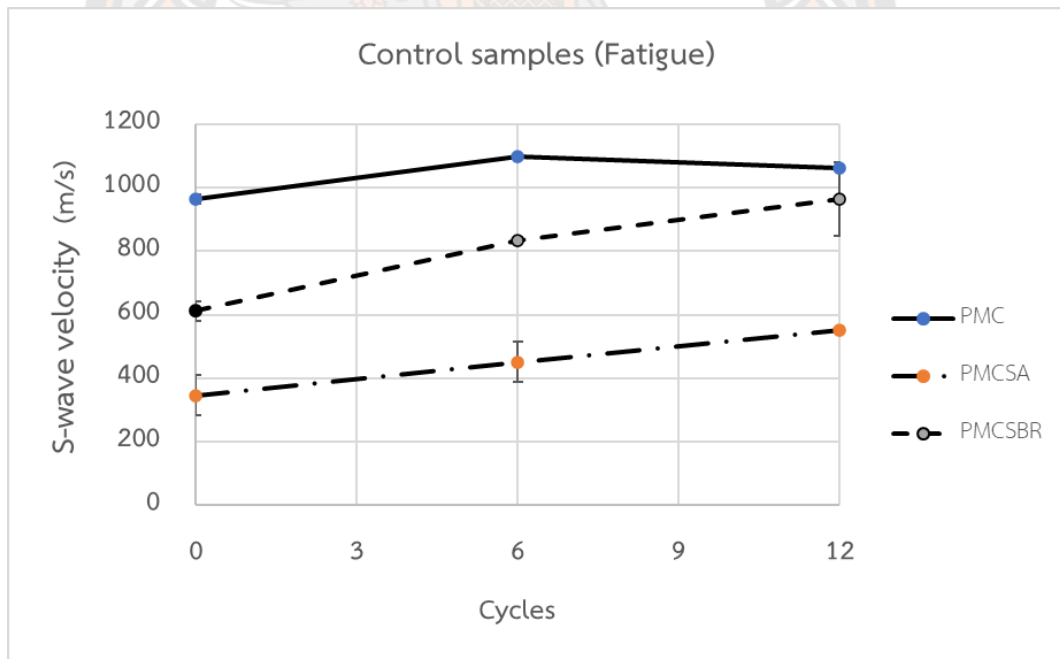


รูปที่ 4-31 ผลการทดสอบ S-Wave Velocity

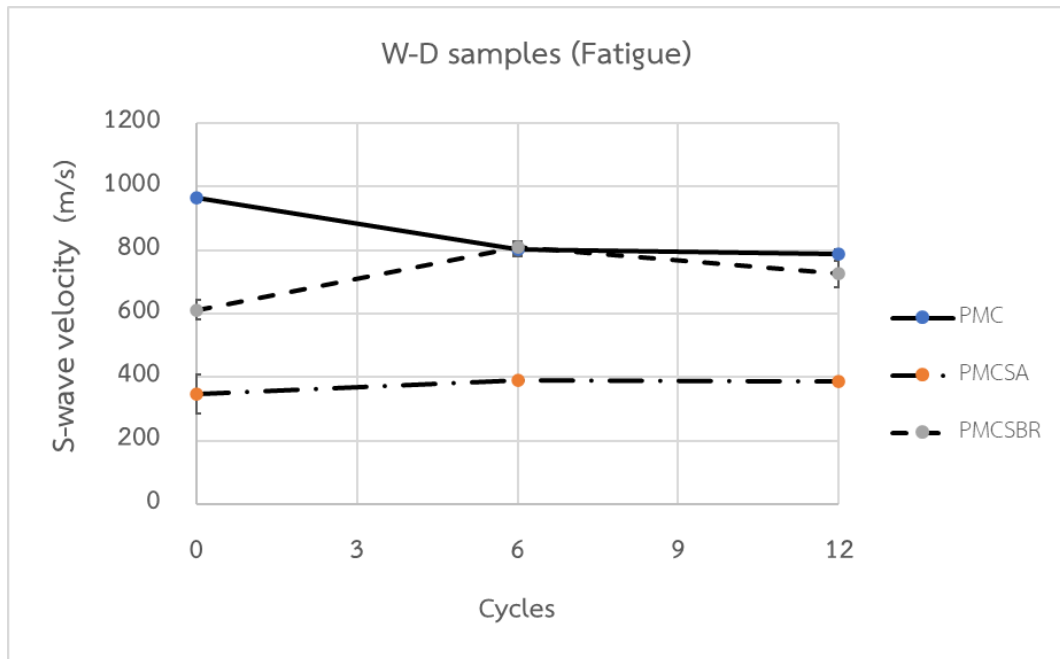
ตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบไม่ผ่านการขัด (W-D) (ตัวอย่าง IDT)



รูปที่ 4-32 ผลการทดสอบ S-Wave Velocity ตัวอย่างผ่านกระบวนการเป็ยกลลับแห้งแบบผ่านการขัด (Brushed) (ตัวอย่าง IDT)

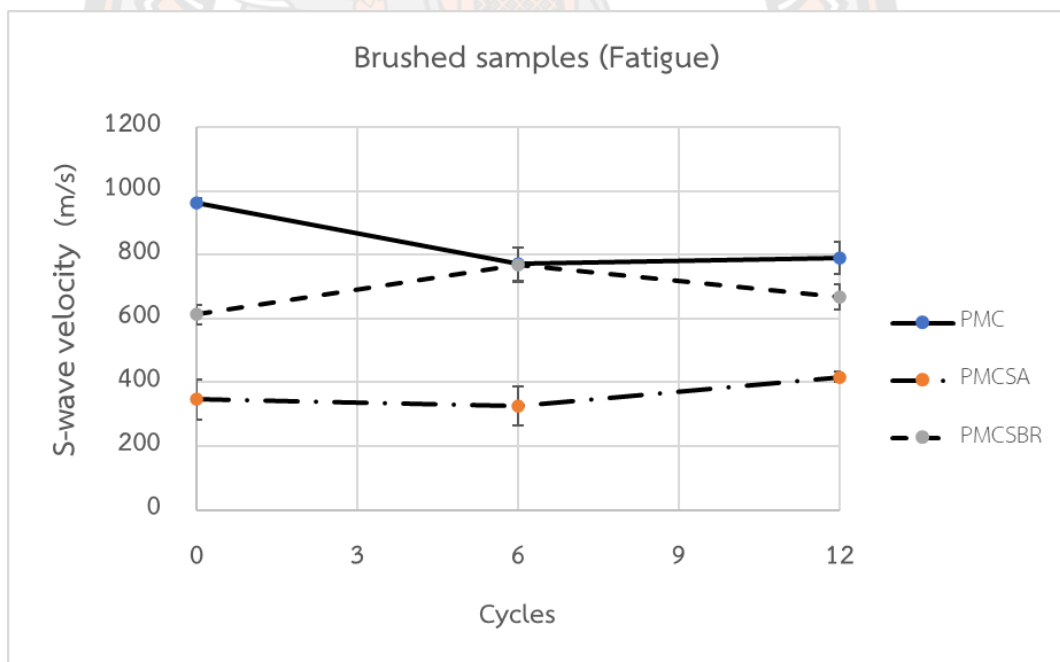


รูปที่ 4-33 ผลการทดสอบ S-Wave Velocity ตัวอย่างควบคุม(ตัวอย่าง Fatigue)



รูปที่ 4-34 ผลการทดสอบ S-Wave Velocity

ตัวอย่างผ่านกระบวนการเป็ยกสลับแห้งแบบไม่ผ่านการขัด (W-D) (ตัวอย่าง Fatigue)



รูปที่ 4-35 ผลการทดสอบ S-Wave Velocity

ตัวอย่างผ่านกระบวนการเป็ยกสลับแห้งแบบผ่านการขัด (Brushed) (ตัวอย่าง Fatigue)

จากรูป 4-30,35 แสดงค่าความเร็วคลื่น S-wave ของตัวอย่างขนาด D/L 1.56 หรือตัวอย่างที่จะถูกนำไปทำการทดสอบ IDT และ Fatigue เช่นเดียวกับการทดสอบหาค่าความเร็วคลื่น P-wave ซึ่งให้

ค่าที่ไปในทิศทางเดียวกันและมีผลที่ใกล้เคียงกัน ค่าที่แสดงข้างต้นเป็นค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง

โดยในกลุ่มตัวอย่าง Control รูปที่ 4-30 และ 4-33 ค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุชนิด PMC จะให้ค่าสูงสุดโดยจะมีการพัฒนาความเร็วคลื่น S-wave ในช่วง 0-6 cycles จากนั้นจะเริ่มคงที่โดยเมื่อครบ 12 Cycles จะมีค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 10 ซึ่งมีการพัฒนาความเร็วคลื่นเพียงเล็กน้อย โดยวัสดุชนิด PMCSBR จะมีการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆตั้งแต่ 0-12 Cycles โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 610 ถึง 960 m/s คิดเป็นร้อยละ 39 วัสดุชนิด PMCSA ยังคงให้ค่าที่ต่ำที่สุดมีแต่การพัฒนาความเร็วคลื่น S-wave ยังคงเพิ่มตลอด 0-12 cycles โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 560 ถึง 780 m/s คิดเป็นร้อยละ 22

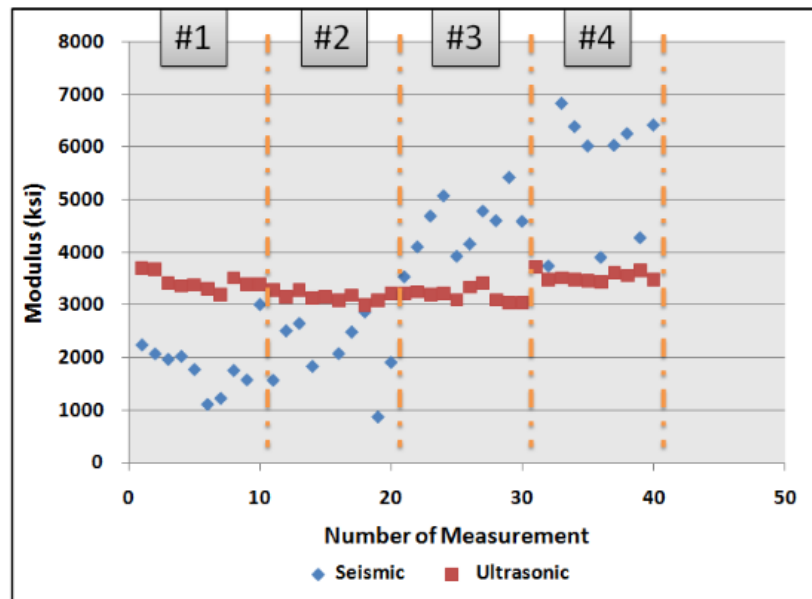
สำหรับกลุ่มตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งแบบไม่ผ่านการขัดสี (W-D) และ แบบผ่านการขัด (Brushed) ค่าความเร็วคลื่น S-wave ของวัสดุชนิด PMC จะลดลงเมื่อตัวอย่างผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้ง โดย PMC จะมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 18 ส่วนวัสดุ PMCSA ลดลงร้อยละ 20 ส่วนวัสดุชนิด PMCSBR จะมีค่าเพิ่มร้อยละ 9

4.5 การประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีดั้งเดิมและแบบไม่ทำลายจากตัวอย่างที่จำการเสื่อมสภาพด้วยการทดสอบเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying)

จากผลการทดสอบในหัวข้อ 4.4.2 ถึง 4.4.4 เป็นผลการทดสอบแบบดั้งเดิมและในหัวข้อ 4.4.5 เป็นผลการทดสอบแบบไม่ทำลายตัวอย่างซึ่งจากผลการทดสอบจะพบว่าตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งทั้งกลุ่ม W-D และ กลุ่ม Brushed ผลการทดสอบ UCS, IDT และ Fatigue จะให้ผลที่มีแนวโน้มไม่ตรงกับกับการทดสอบแบบไม่ทำลายตัวอย่าง ทั้ง P-wave และ S-wave

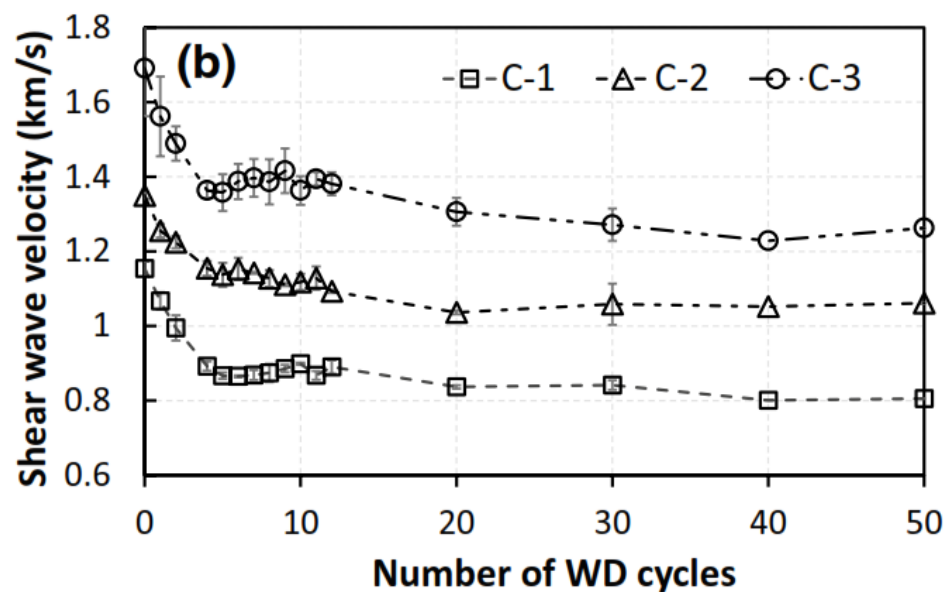
โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Kassab & Weller, 2015) จากการศึกษาพบว่า ช่องว่างของวัสดุ, การดูดซึมน้ำของวัสดุและความหนาแน่นของวัสดุนั้น ส่งผลให้ผลการทดสอบ P-wave และ S-wave ค่อนข้างแย่มาก นอกจากนั้น การทดสอบวัสดุในสภาพที่แห้ง จะส่งผลให้ค่า P-wave และ S-wave สูงกว่าวัสดุที่อยู่ในสภาพเปียก และยังกล่าวอีกว่า อีกปัจจัยที่ส่งผลถึงค่า P-wave และ S-wave คือ สภาพเนื้อของวัสดุซึ่งทำให้ผลที่ออกมาที่มีความแปรปรวนสูง

(Wen et al., 2014) ได้ทำการทดสอบโดย 2 วิธีการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่า seismic modulus โดยการทดสอบซ้ำ 10 ครั้ง พบว่า การทดสอบด้วยวิธี FFR นั้นจะให้ค่า Seismic modulus อยู่ระหว่าง 1,000 – 7,000 ksi ต่อ 1 วัสดุ ซึ่งเมื่อเทียบกับการทดสอบโดยวิธี Ultrasonic Test ผลการทดสอบจะให้ค่าอยู่ระหว่าง 3,000 ksi – 3,800 ksi ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าผลการทดสอบ FFR นั้นจะให้ค่าที่มีความแปรปรวนสูงเมื่อทดสอบในวัสดุชนิดเดียวกัน



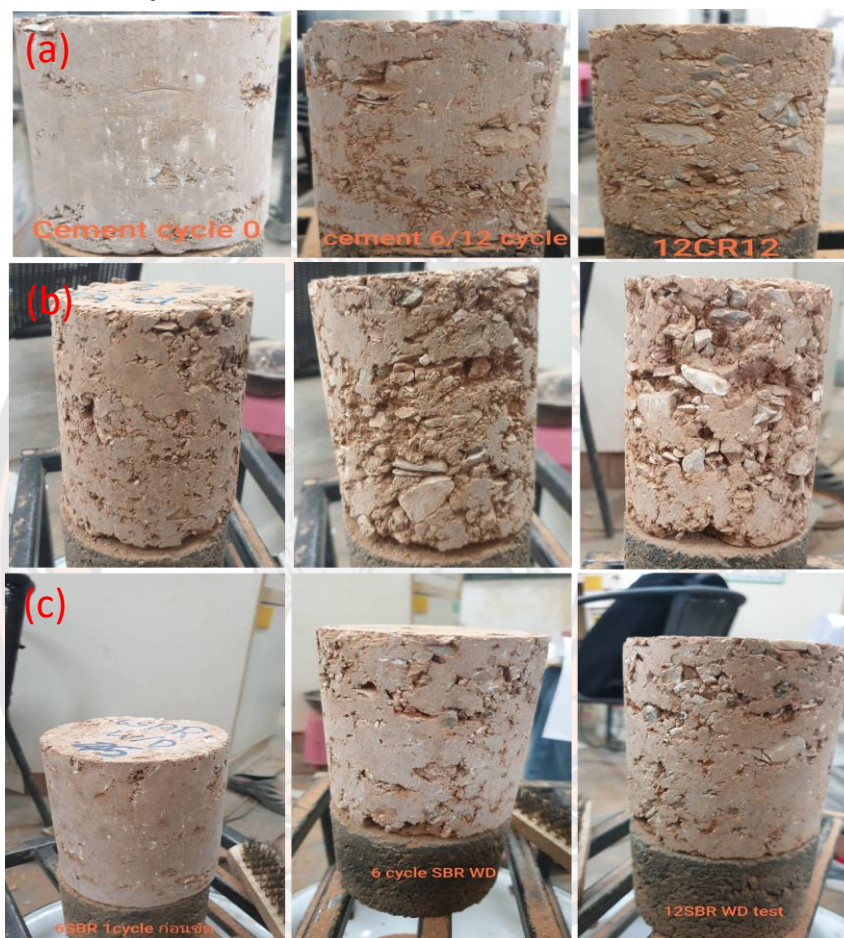
รูปที่ 4-36 ผลลัพธ์ของการทดสอบ Modulus จากการทดสอบด้วยวิธี Seismic และ Ultrasonic Tests ของวัสดุ Gravel-Cement (Wen et al., 2014)

(Gowthaman et al., 2021) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของกระบวนการเปียกสลับแห้ง (wet-dry cycles) ของวัสดุ Bio-cemented soil โดยการทดสอบในสภาพที่ตัวอย่างแห้งผลการทดสอบสามารถแบ่งการเสื่อมสภาพได้เป็น 2 ระดับ โดยระดับแรก จะอยู่ระหว่าง 0-5 cycles โดยจะเกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว และเมื่อผ่าน 5 cycles ไปจะมีการพัฒนาค่าความเร็วคลื่น Shear wave เพิ่มอีกเล็กน้อยและจะเริ่มคงที่ไปจนถึง 50 cycle



รูปที่ 4-37 ผลการทดสอบ Shear wave velocity วัสดุที่ปรับปรุงด้วย Cement ผ่านกระบวนการ WD cycles (Gowthaman et al., 2021)

โดยจากผลการทดสอบในงานวิจัยนี้เมื่อนำมาเปรียบเทียบและประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีดั้งเดิมและแบบไม่ทำลายตัวอย่างจะพบว่า ผลการทดสอบกลุ่มตัวอย่าง Control จะมีค่า P-wave และ S-wave ที่มีแนวโน้มเดียวกับการทดสอบ UCS และ IDT แต่เมื่อตัวอย่างผ่านกระบวนการ W-D สภาพของตัวอย่างจะเกิดการหลุดร่อนของวัสดุทำให้วัสดุที่ทำการทดสอบมีสภาพผิวที่ขรุขระซึ่งส่งผลต่อค่าการทดสอบ FFR (รูปที่ 4-38)



รูปที่ 4-38 ตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งโดยผ่านการขัด (a) PMC, (b) PMCSA และ (c) PMCSBR

และเมื่อพิจารณาค่า S-wave (รูปที่ 4-28,29) ในการศึกษาครั้งนี้จะพบว่าในช่วง 0-6 Cycles จะแสดงให้เห็นการเสื่อมสภาพในระยะแรกถ้าเปรียบเทียบกับงานวิจัย (Gowthaman et al., 2021) ค่า S-wave จะลดลงในช่วง 0-5 Cycles หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและให้ค่าที่ค่อนข้างคงที่ พิจารณาค่าความเร็วคลื่น P-wave และ S-wave ที่ผ่านกระบวนการ WD เมื่อเทียบกับตัวอย่าง Control ก็จะทำให้เห็นว่าการเสื่อมสภาพลงของวัสดุ

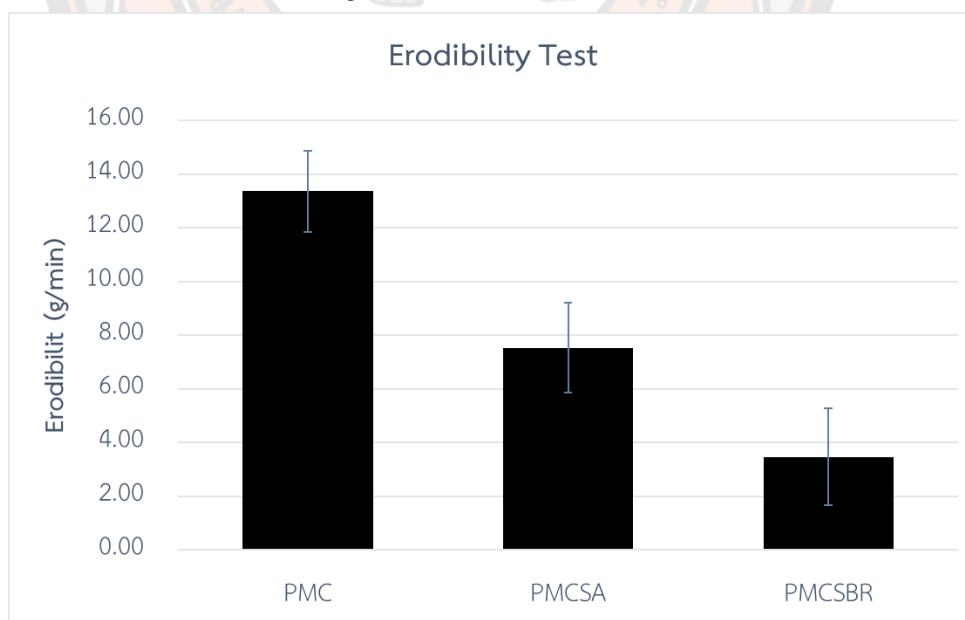
อย่างไรก็ตามเมื่อนำผลการทดสอบแบบไม่ทำลายมาเทียบกับแบบทำลายนั้นผลการทดสอบค่อนข้างไม่ตรงกันโดยจากสมมติฐานและงานวิจัยที่ผ่านมาอาจเกิดจากสภาพตัวอย่างที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งเกิดจากระบวนการเปียกสลับแห้งทำให้เกิดการหลุดร่อนของผิวตัวอย่าง และผลการทดสอบ S-wave และ P-wave ที่ได้นั้นเกิดจากคอนกรีตตัวอย่างซึ่งมีโอกาสทำให้ค่าแปรปรวนสูง

4.6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพความคงทนต่อความชื้นของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และซีเมนต์พอลิเมอร์

โดยการศึกษาประสิทธิภาพความคงทนต่อความชื้นในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทั้งหมด 2 วิธี คือ การทดสอบ Erodibility Tests และ การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Capillary Rise Test) โดยมีผลการศึกษาดังนี้

4.6.1 ผลการทดสอบ Erodibility Tests

ในการศึกษานี้ทำการทดสอบภายใต้การประยุกต์ใช้ใน ประเทศออสเตรเลีย “Erodibility of stabilized road construction materials: Test Method T186” เพื่อศึกษาการการสึกกร่อนของวัสดุ โดยการทดสอบนี้จะทดสอบโดยใช้โต๊ะเขย่า ใช้เวลา 15 นาที เมื่อครบเวลาจะทำการหาน้ำหนักของวัสดุที่หลุดออกมาจากตัวอย่างในหน่วยกรัม และนำมาหารด้วย 15 ซึ่งเป็นจำนวนนาทีในการทดสอบ ผลการศึกษาจึงมีหน่วยเป็น (g/min)



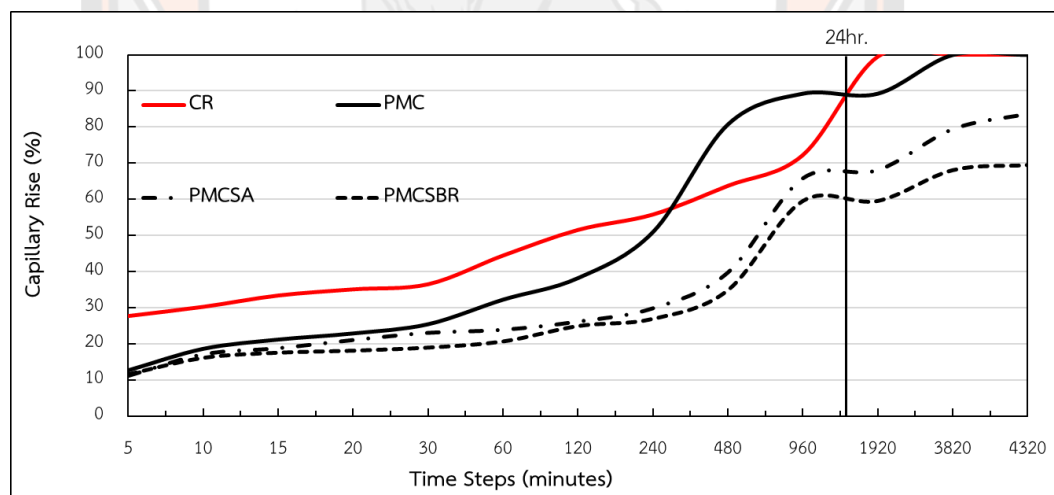
รูปที่ 4-39 ผลการศึกษาค่าความคงทนของวัสดุที่ผ่านการทดสอบ Erodibility test

จากรูปที่ 4-39 จะพบว่าวัสดุชนิด PMC จะมีค่าการสึกกร่อนของวัสดุอยู่ที่ 13.36 g/min ซึ่งมากกว่าวัสดุที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด โดยวัสดุ PMCSA มีค่าการสึกกร่อนอยู่ประมาณ 7.53 g/min และวัสดุชนิด PMCSBR มีค่าการสึกกร่อนของวัสดุต่ำสุด ซึ่งมีค่าประมาณ 3.47 g/min

โดยจะเห็นได้ชัดว่าวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์นั้นสามารถช่วยลดการสึกกร่อนของวัสดุได้ดีกว่าวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์เพียงอย่างเดียว โดยวัสดุที่ปรับด้วยพอลิเมอร์ชนิด SA จะช่วยลดการสึกกร่อนของวัสดุได้ประมาณ 2 เท่า และวัสดุที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ชนิด SBR จะช่วยลดการสึกกร่อนของวัสดุได้ดีกว่าวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์เพียงอย่างเดียวถึง 3 เท่า

4.6.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Capillary Rise Test)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาการดูดซึมน้ำของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์และซีเมนต์พอลิเมอร์ โดยในการศึกษาครั้งนี้ทำการทดสอบทั้งหมด 4 วัสดุ คือ 1. วัสดุหินคลุก (CR) 2. วัสดุหินคลุกปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (PMC) 3. วัสดุหินคลุกปรับปรุงด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ชนิด SA (PMCSA) 4. วัสดุหินคลุกปรับปรุงด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ชนิด SBR (PMCSBR) โดยจะแสดงผลเป็นค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ (%Capillary Rise) ของแต่ละวัสดุซึ่งคิดจากสมการ (2-10)

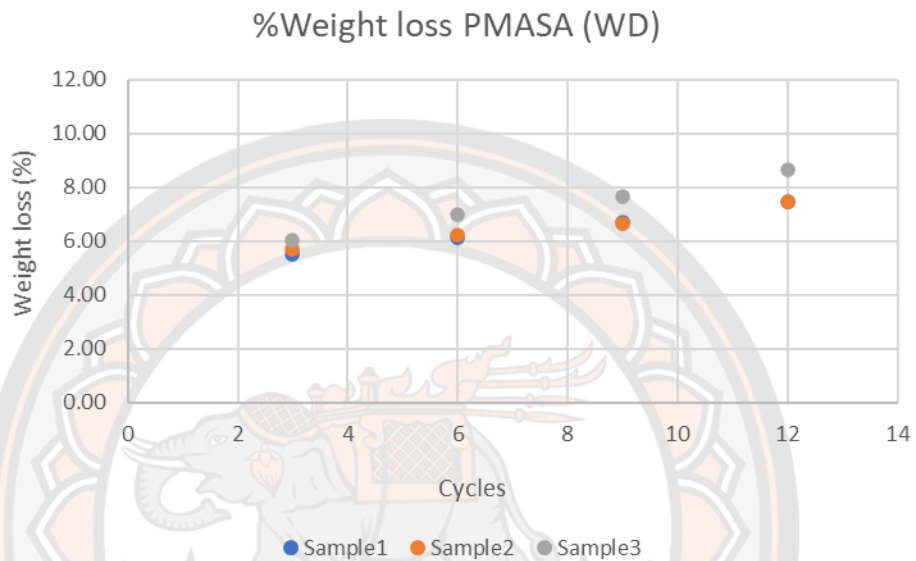


รูปที่ 4-40 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Capillary Rise Test)

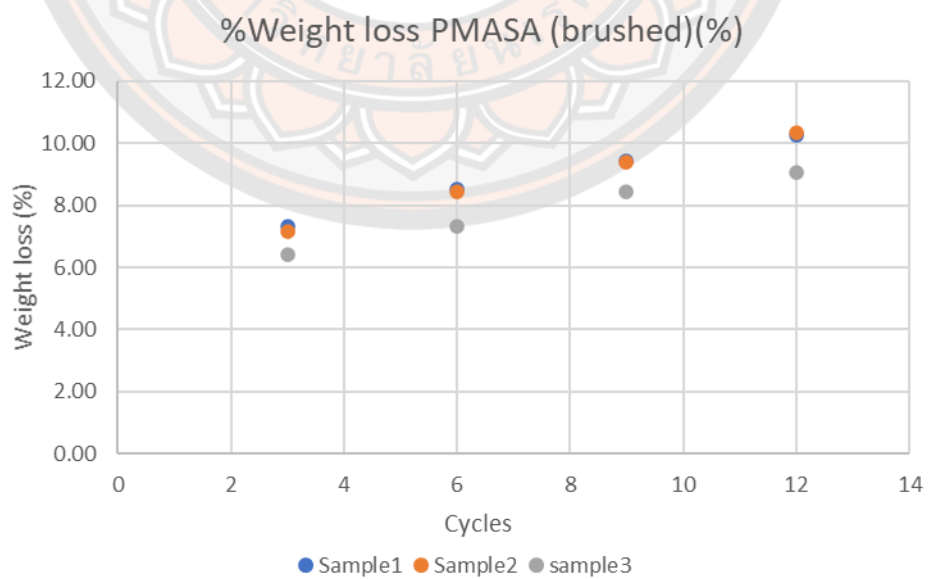
จากรูปที่ 4-40 แสดงให้เห็นว่าการดูดซึมน้ำของแต่ละวัสดุจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่แช่ตัวอย่างไว้ในน้ำเพิ่มขึ้น โดยวัสดุหินคลุก (CR) ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพจะมีการดูดซึมน้ำเต็มก่อนตัวอย่างเมื่อระยะเวลาผ่านไป 1 วัน และเมื่อวัสดุได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้ว วัสดุชนิด PMC จะช่วยยืดเวลาในการดูดซึมน้ำโดยจะดูดซึมน้ำเต็มตัวอย่างใช้เวลาประมาณ 1920 นาที หรือประมาณ 32 ชั่วโมง แต่เมื่อได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดสามารถทำให้ดูดซึมน้ำได้ช้าลง โดยวัสดุชนิด PMCSBR สามารถดูดซึมน้ำได้ช้ากว่า วัสดุชนิด PMCSA

4.7 พฤติกรรมของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์และซีเมนต์พอลิเมอร์เมื่อผ่านการจำลองการเสื่อมสภาพด้วยวิธี Wetting and Drying Test

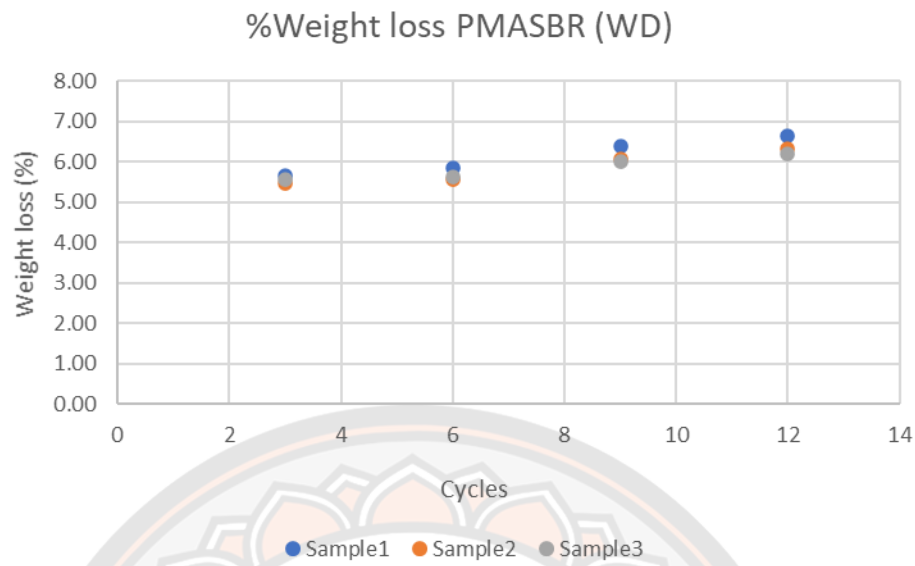
ในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลจากตัวอย่างที่ทำการขึ้นแต่ละตัวอย่างมาวิเคราะห์เพื่อสังเกตพฤติกรรมคุณสมบัติของวัสดุที่เปลี่ยนไปเมื่อผ่านกระบวนการจำลองการเสื่อมสภาพด้วยวิธีเปียกสลับแห้ง



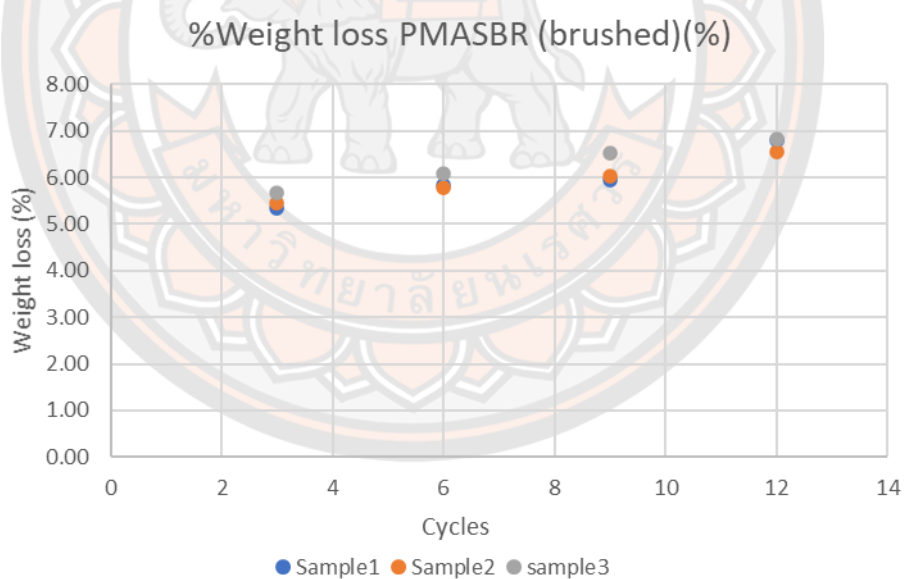
รูปที่ 4-41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียน้ำหนักสะสมและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัด (PMCSA)



รูปที่ 4-42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียน้ำหนักสะสมและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งผ่านการขัด (PMCSA)



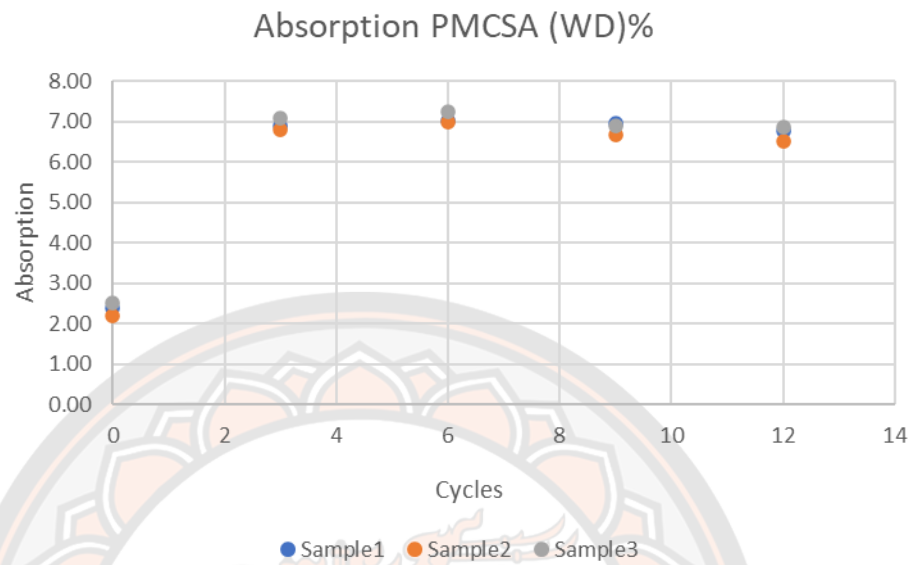
รูปที่ 4-43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียน้ำหนักสะสมและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัด (PMCSBR)



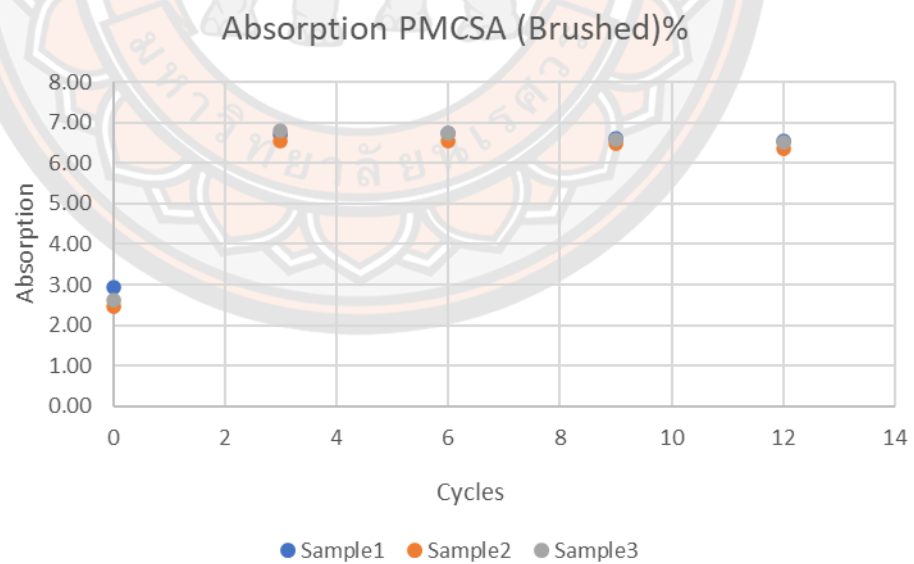
รูปที่ 4-44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียน้ำหนักสะสมและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งผ่านการขัด (PMCSBR)

จากรูป 4- 41,42,43,44 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบการสึกกร่อนของวัสดุโดยวิธีเปียกสลับแห้งจะพบว่าวัสดุชนิด PMCSA และ PMCSBR เมื่อผ่านกระบวนการการจำลองการเสื่อมสภาพแล้วนั้นจะมีการสึกกร่อนและสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวน Cycles มากขึ้น PMCSA มีแนวโน้มที่สูญเสียน้ำหนักมากกว่าวัสดุชนิด PMCSBR

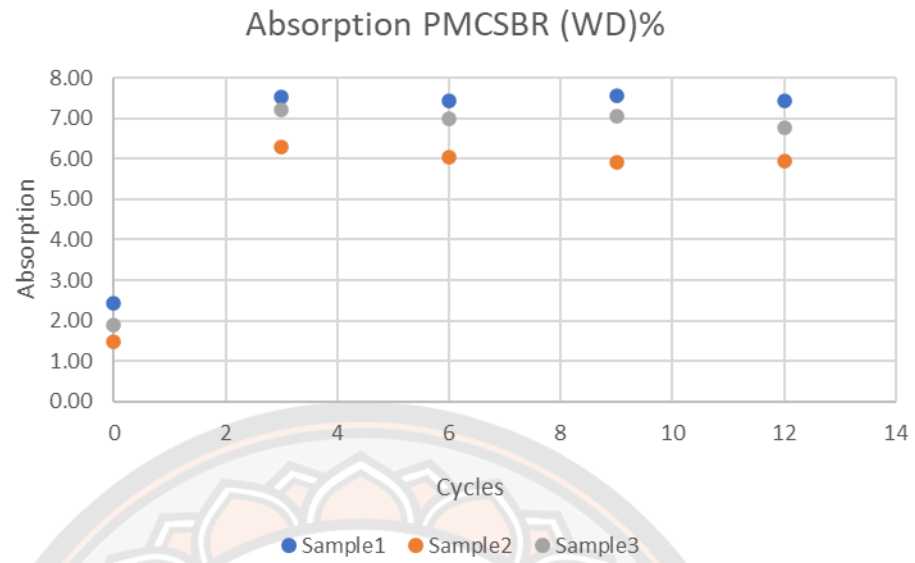
เมื่อมาวิเคราะห์ค่าการดูดซึมน้ำ (Absorption) และจำนวน Cycles ก็จะพบว่าค่าการดูดซึมน้ำของทั้งสองวัสดุมีค่าค่อนข้างคงที่ แสดงดังรูปที่ 4-45,46,47,48



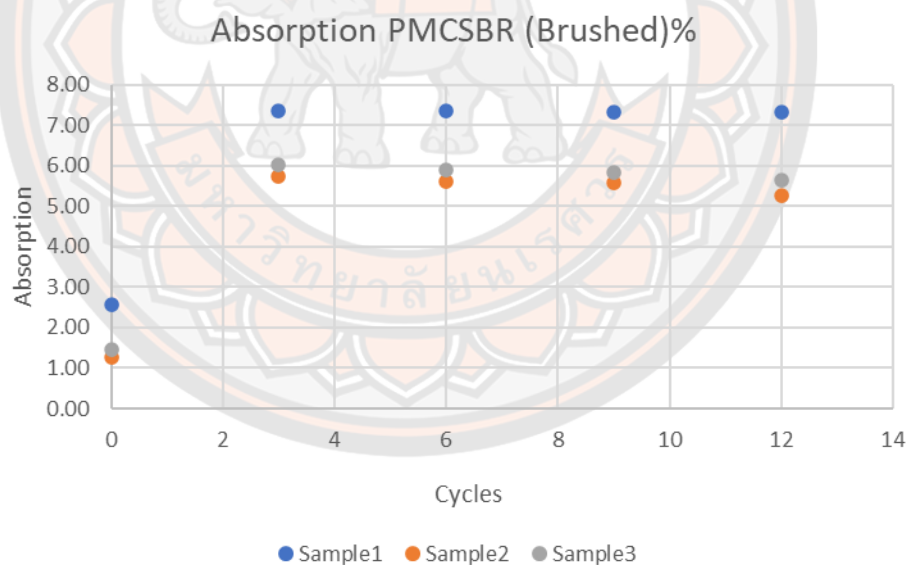
รูปที่ 4-45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัด (PMCSA)



รูปที่ 4-46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งผ่านการขัด (PMCSA)

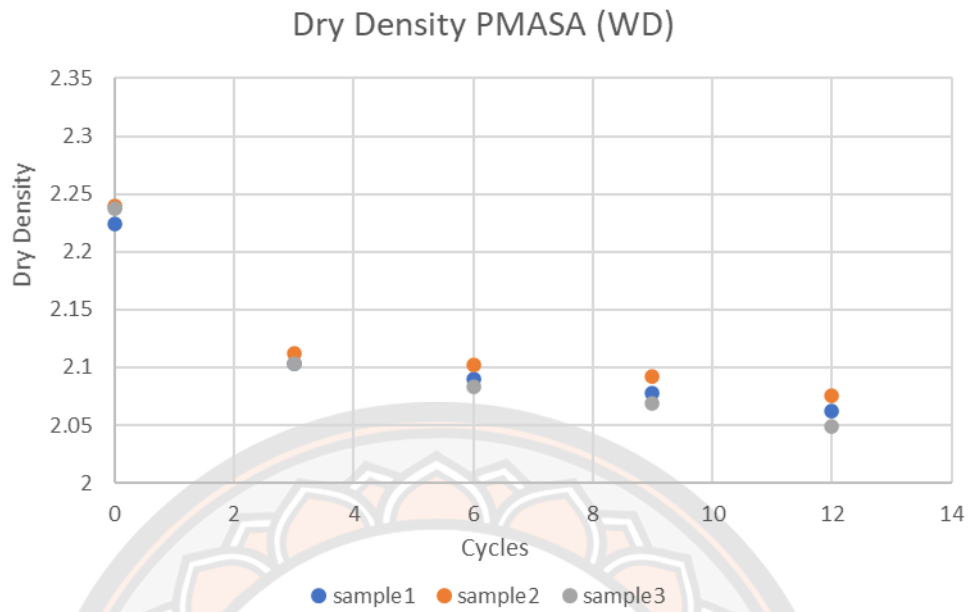


รูปที่ 4-47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัด (PMCSBR)

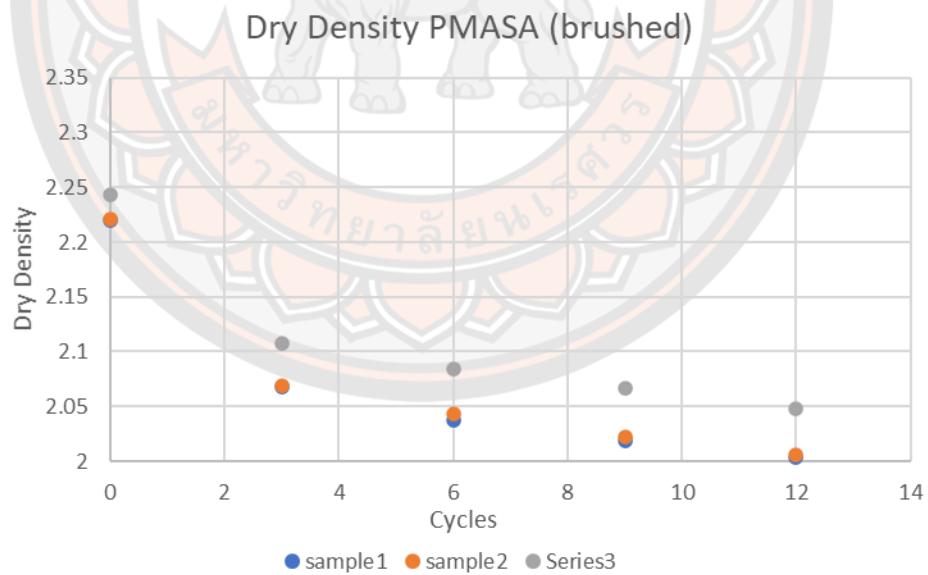


รูปที่ 4-48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัด (PMCSBR)

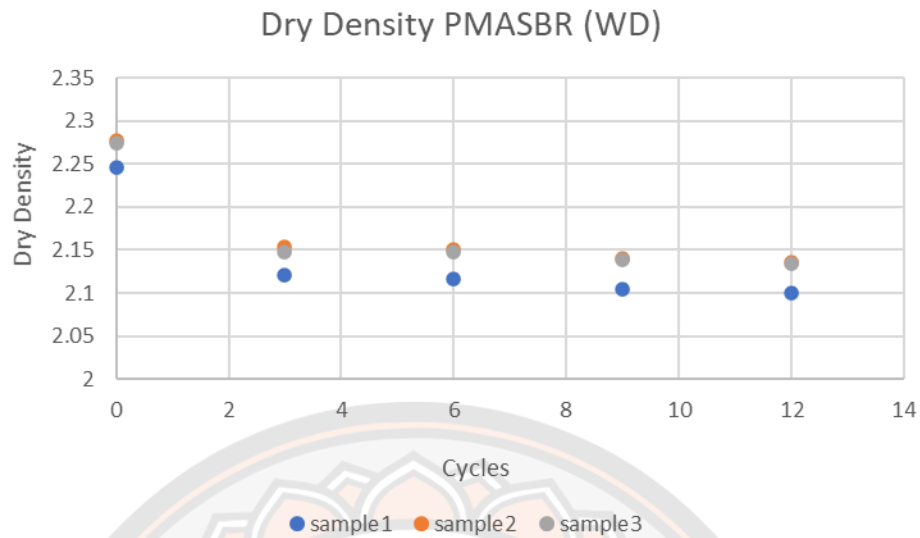
โดยกระบวนการจำลองการเสื่อมสภาพด้วยวิธีเปียกสลับแห้ง ส่งผลให้วัสดุมีการดูดซึมน้ำได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามจำนวนรอบการทดสอบส่งผลต่อค่าการดูดซึมน้ำค่อนข้างน้อยโดยวัสดุชนิด PMCSA จะมีแนวโน้มในการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าวัสดุชนิด PMCSBR



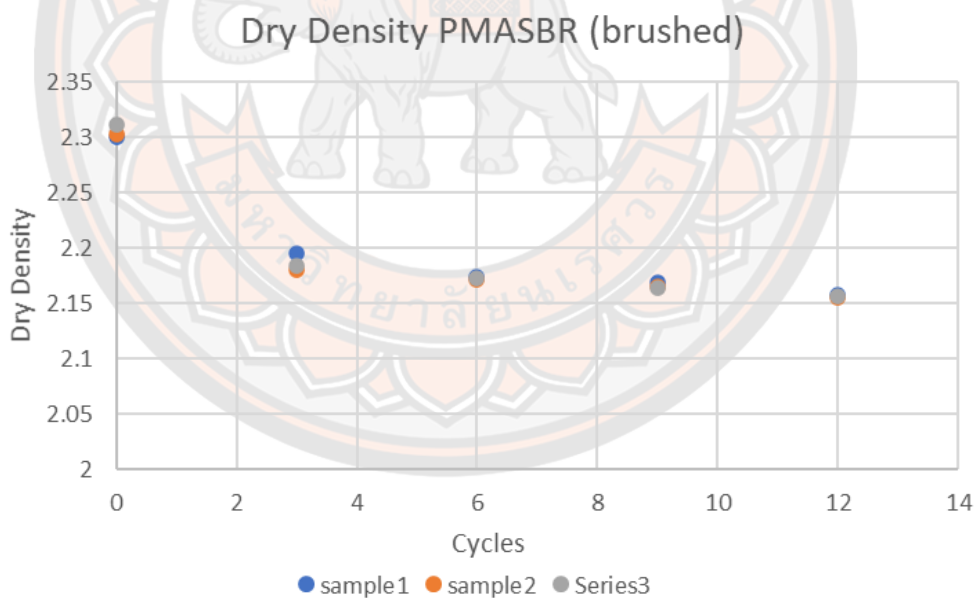
รูปที่ 4-49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัด (PMCSA)



รูปที่ 4-50 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งผ่านการขัด (PMCSA)



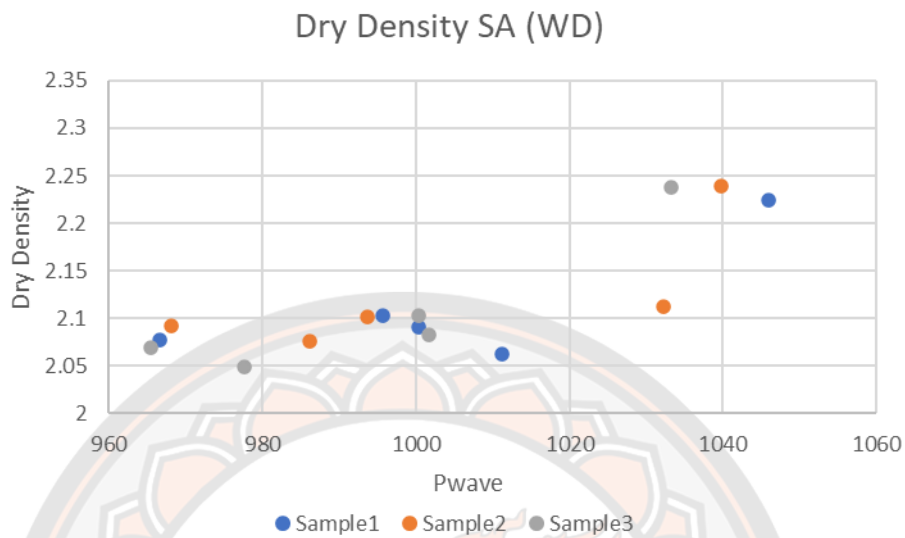
รูปที่ 4-51 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัด (PMCSBR)



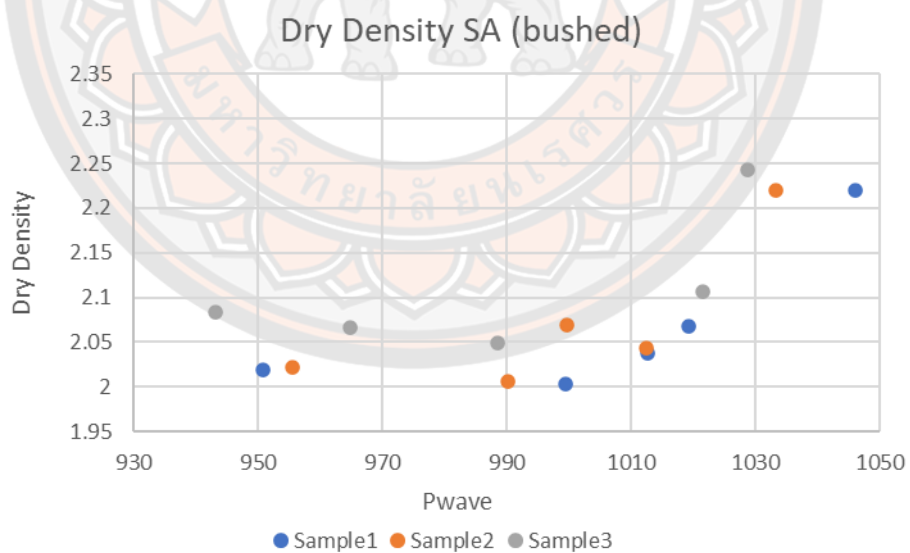
รูปที่ 4-52 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและจำนวน Cycles ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งผ่านการขัด (PMCSBR)

จากรูป 4-49,50,51,52 จากกราฟแสดงให้เห็นว่า ค่าความหนาแน่นแห้งจะลดลงเมื่อผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้ง โดยในการคำนวณหาจะใช้ค่าปริมาตรของวัสดุที่คง อย่างไรก็ตาม ในการทดสอบมีการหลุดล่อนของวัสดุระหว่างกระบวนการเปียกสลับแห้ง ส่งผลให้น้ำหนักและปริมาตรมี

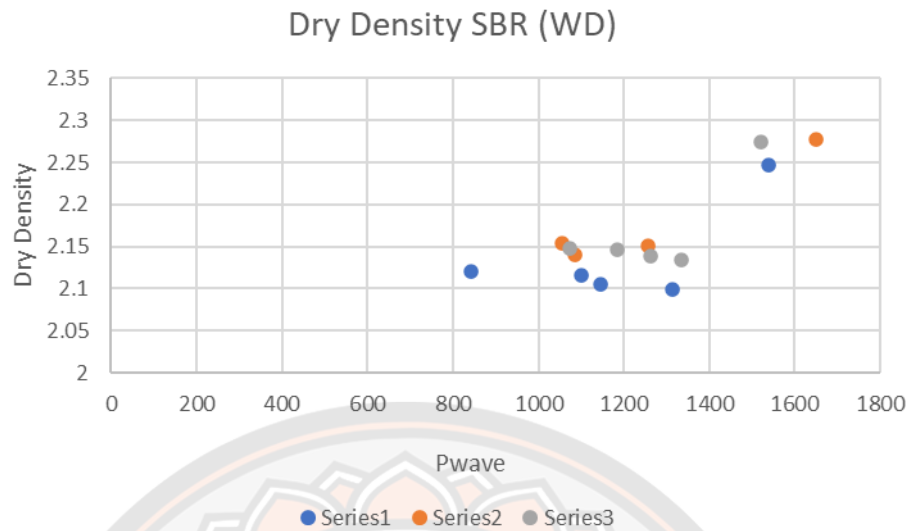
การเปลี่ยนแปลงส่งผลต่อค่าความหนาแน่นแห้งที่คำนวณได้เช่นกัน ทั้งนี้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นแห้งของวัสดุทั้งสองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน



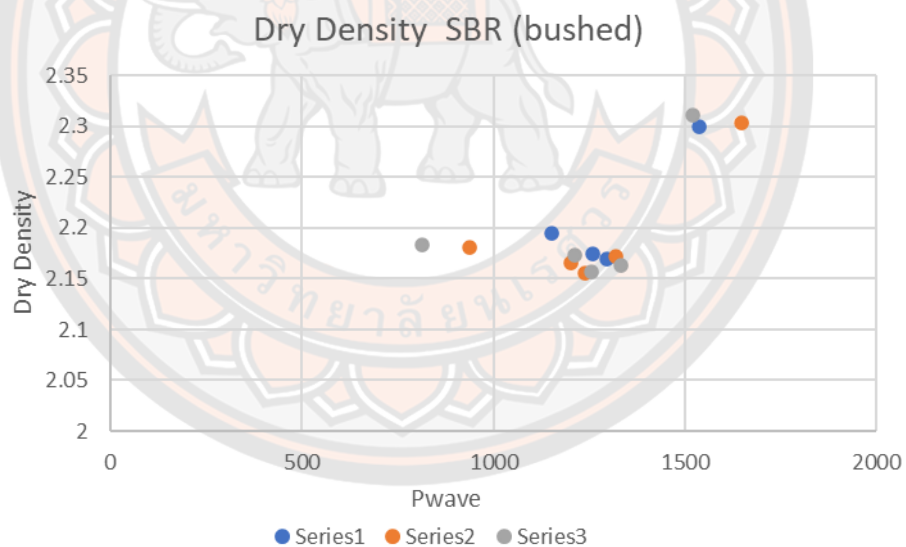
รูปที่ 4-53 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัด (PMCSA)



รูปที่ 4-54 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งผ่านการขัด (PMCSA)

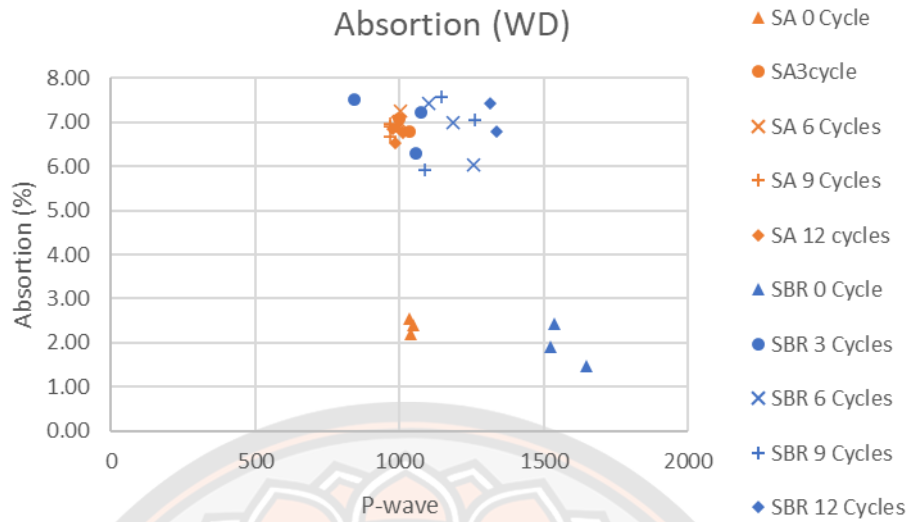


รูปที่ 4-55 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัด (PMCSBR)

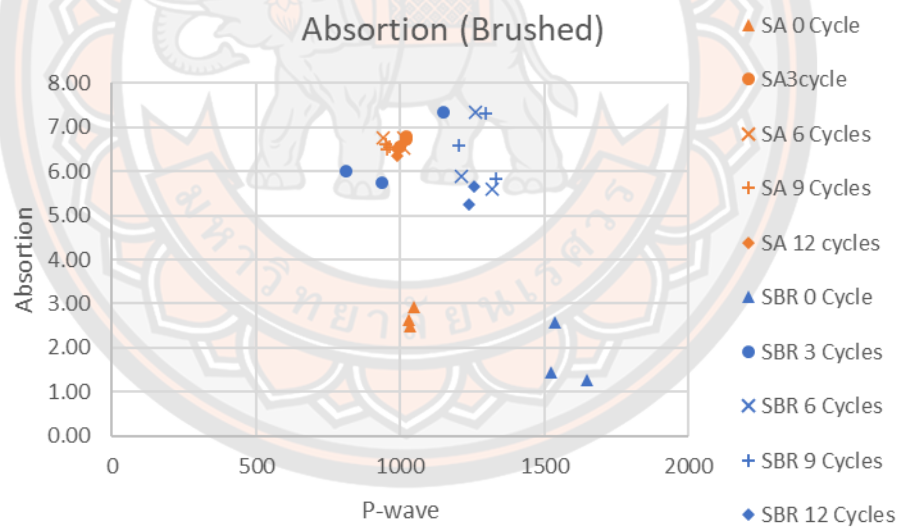


รูปที่ 4-56 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งผ่านการขัด (PMCSBR)

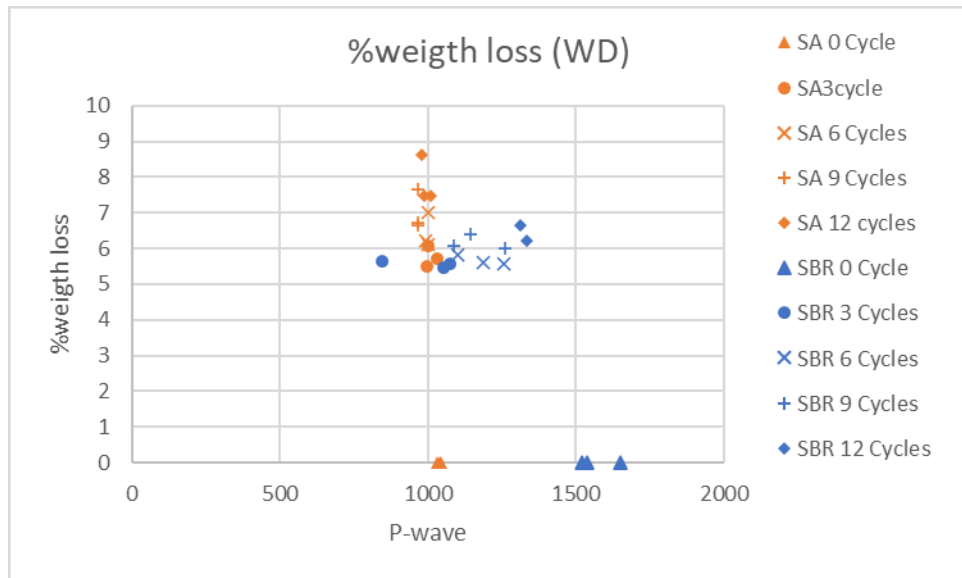
จากรูปที่ 4-53,54,55,56 เมื่อนำผลการทดสอบ P-wave มาวิเคราะห์ร่วมกับค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) จะพบว่าค่าความหนาแน่นแห้งมีความสัมพันธ์ร่วมกับค่าความเร็วคลื่น P-wave เมื่อวัสดุทั้งสองชนิดมีค่าความหนาแน่นแห้งสูง ค่าความเร็วคลื่น P-wave ก็จะมีสูงขึ้นไปเช่นเดียวกัน และเมื่อค่าความหนาแน่นแห้งลดลง ก็ส่งผลให้ ค่า P-wave ลดลง



รูปที่ 4-57 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัดของวัสดุทั้ง 2 ชนิด



รูปที่ 4-58 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งผ่านการขัดของวัสดุทั้ง 2 ชนิด



รูปที่ 4-59 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักสะสมและค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งไม่ผ่านการขัดของวัสดุทั้ง 2 ชนิด



รูปที่ 4-60 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักสะสมและค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งผ่านการขัดของวัสดุทั้ง 2 ชนิด

จากรูป4-57,58,59,60 เมื่อนำผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่น P-wave ของแต่ละตัวอย่างมาวิเคราะห์ร่วมกับค่าการสูญเสียน้ำหนัก ค่าการดูดซึมน้ำและค่าความหนาแน่นแห้งของวัสดุ จะเห็นได้ว่า วัสดุชนิด PMCSA จะมีการเกาะกลุ่มของค่า P-wave ที่ไม่กระจายเนื่องจากผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่น P-wave ของวัสดุชนิด PMCSA เมื่อผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้ง พฤติกรรมของวัสดุทั้ง 2 ชนิดไม่เหมือนกันโดยเมื่อค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุของวัสดุชนิด

PMCSA เพิ่มขึ้น ค่าความเร็วคลื่น P-wave จะลดลง ในส่วนของวัสดุชนิด PMCSA ค่าความเร็วคลื่น
ไม่มีความเปลี่ยนแปลง แต่ค่าการดูดซึมน้ำและค่าการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลง

ทั้งนี้ ผู้วิจัยจึงแนะนำให้ผู้ที่สนใจนำไปศึกษาต่อให้นำวัสดุดังกล่าวทดสอบระดับจุลภาค เช่น
SEM เพื่อช่วยดูโครงสร้างระดับ Microstructure เพิ่มเติม



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ(1)ประเมินประสิทธิภาพพระยะยาวและความคงทนของชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และซีเมนต์พอลิเมอร์จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและ (2)การประเมินคุณสมบัติชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมและแบบไม่ทำลายจากตัวอย่างที่จำลองการเสื่อมสภาพด้วยการทดสอบเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying) โดยจากผลการทดสอบในบทที่ 4 สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ประเมินประสิทธิภาพพระยะยาวและความคงทนของชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และซีเมนต์พอลิเมอร์จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

- การทดสอบการจำลองการเสื่อมสภาพของวัสดุโดยวิธี Wetting and drying พบว่า วัสดุชนิด PMCSBR สามารถคงทนต่อการสูญเสียน้ำหนักได้ดีกว่าวัสดุชนิด PMC และ PMCSA อาจกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์ชนิด SBR ช่วยในการยึดเกาะวัสดุและสามารถช่วยลดการสูญเสีย น้ำหนักของวัสดุ แต่อย่างไรก็วัสดุที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ชนิด SA มีค่าการสูญเสีย น้ำหนักมากที่สุดในสามวัสดุ อาจกล่าวได้ว่า
- การทดสอบการสึกกร่อนของวัสดุ(Erodibility tests) พบว่า วัสดุที่ผสมด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ ทั้งสองชนิดสามารถทนต่อการสึกกร่อนของวัสดุได้ดีกว่า วัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์เพียงอย่างเดียว โดยวัสดุชนิด PMCSBR สามารถทนต่อการสึกกร่อนได้ดีกว่า วัสดุชนิด PMCSA และ PMC อย่างไรก็ตามผลการทดสอบการสึกกร่อนของวัสดุในวิธีนี้ให้ผลที่ต่างจากการทดสอบการจำลองการเสื่อมสภาพของวัสดุโดยวิธี Wetting and drying ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากวิธีการทดสอบและขั้นตอนการทดสอบ
- การทดสอบการดูดซึมน้ำของวัสดุพบว่า วัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด สามารถดูดซึมน้ำได้ช้ากว่าวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์เพียงอย่างเดียว โดยวัสดุชนิด PMCSBR สามารถดูดซึมน้ำได้ช้ากว่าวัสดุชนิด PMCSA และ PMC ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติลดช่องว่างในมวลดินของวัสดุ ทำให้ช่วยในด้านการทนต่อความชื้นได้
- การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (UCS) ของวัสดุพบว่า วัสดุชนิด PMC มีค่า UCS สูงสุด อย่างไรก็ตามวัสดุชนิด PMCSBR มีค่า UCS ต่ำกว่า วัสดุ PMC เพียงเล็กน้อย และค่า UCS ของวัสดุชนิด PMCSA มีค่าต่ำสุดและมีการพัฒนากำลังเพียงเล็กน้อยตลอดอายุการบ่ม 31 วัน โดยวัสดุทั้งสามเมื่อผ่านการจำลองการเสื่อมสภาพโดยวิธี Wetting and drying จะพบว่ากำลังของวัสดุทั้งสามจะลดลงเมื่อผ่านกระบวนการทั้งหมด 6 Cycle

- การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (IDT) ของวัสดุงานทางที่ได้รับการปรับปรุงทั้งสามชนิดพบว่า วัสดุที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ชนิด SBR ทำให้วัสดุชนิด PMCSBR มีการพัฒนา กำลังที่ดีขึ้นและมีประสิทธิภาพ โดยมีค่ากำลังสูงกว่าและพัฒนากำลังได้ดีกว่าวัสดุชนิด PMC และ PMCSA ทั้งในตัวอย่าง Control, W-D และ ตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการขัด และค่า IDT ใดๆก็ตาม วัสดุชนิด PMCSA ตัวอย่างควบคุมจะมีค่าคงที่ตลอด 31 วัน และเมื่อผ่านกระบวนการ W-D และ Brushed ก็ยังให้ค่าต่ำกว่าทุกวัสดุ
- จำนวน Fatigue life ของตัวอย่าง PMC ตัวอย่างควบคุมเพิ่มขึ้นตามเวลาการบ่ม อย่างไรก็ตาม เมื่อผ่านการจำลองการเสื่อมสภาพโดยวิธี W-D ทำให้ Fatigue life ลดลง ซึ่งในลักษณะการทดสอบแบบเดียวกันวัสดุชนิด PMCSBR ยังคงมีค่า Fatigue life ยังมีค่าสูงกว่าวัสดุชนิด PMC และ PMCSA
- วัสดุที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ชนิด SA จะทำให้ประสิทธิภาพของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงในงานวิจัยนี้ลดลงและค่อนข้างไม่มีการพัฒนาในด้านกำลัง
- จากการทดสอบของงานวิจัยนี้กล่าวได้ว่า พอลิเมอร์ชนิด SBR สามารถปรับปรุงคุณภาพในด้านความแข็งแรงและคงทนต่อความล้าของวัสดุงานทางได้อย่างมีประสิทธิภาพนอกจากนี้ วัสดุชนิด PMCSBR ยังช่วยลดการสูญเสียน้ำหนักจากการทดสอบต่างๆ ดังนั้นความทนทานต่อความเสียหายต่อความชื้นสามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่มพอลิเมอร์ชนิด SBR

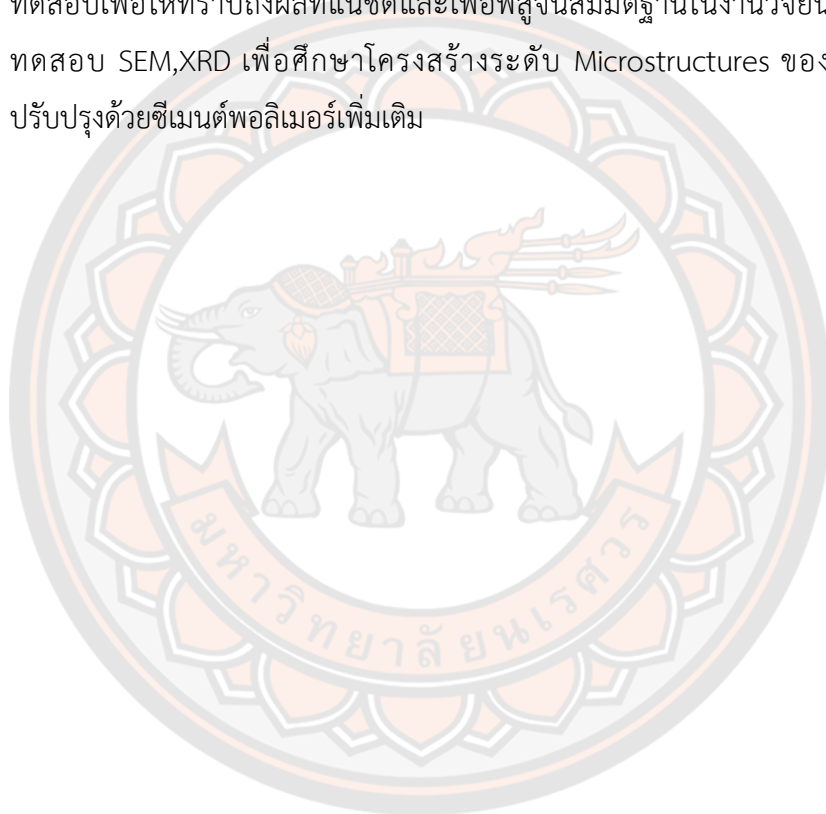
5.2 การประเมินคุณสมบัติขั้นพื้นฐานที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมและแบบไม่ทำลายจากตัวอย่างที่จำลองการเสื่อมสภาพด้วยการทดสอบเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying)

- จากผลการทดสอบของงานวิจัยนี้กล่าวได้ว่า การทดสอบของกลุ่มตัวอย่าง Control ที่ทดสอบด้วยวิธีแบบไม่ทำลายตัวอย่าง จะให้ผลที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับการทดสอบแบบดั้งเดิมโดยเมื่อผลการทดสอบ UCS เพิ่มขึ้น ค่าความเร็วคลื่น P-wave และ S-wave จะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน
- ตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้ง ทั้งแบบขัดและไม่ขัด ที่ทดสอบแบบไม่ทำลายจะให้ค่า P-wave และ S-wave ที่ต่ำกว่าตัวอย่างกลุ่ม Control
- จากการศึกษาพบว่าการสึกกร่อนของวัสดุและตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้ง ส่งผลต่อผลการทดสอบทั้งแบบทำลายตัวอย่าง (UCS, IDT และ Fatigue) และแบบไม่ทำลายตัวอย่าง (P-wave และ S-wave) โดยส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของค่าความเร็วคลื่นทั้งสองชนิดจึงทำให้หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างที่ถูกทำลายและไม่ทำลายไม่ได้

- พฤติกรรมของวัสดุชนิด PMCSBR เมื่อผ่านกระบวนการจำลองการเสื่อมสภาพด้วยการทดสอบเปื่อยกสลับแห้ง จะส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำและการสูญเสียน้ำหนักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีค่าความเร็วคลื่นลดลง
- เมื่อวัสดุทั้ง 3 ผ่านกระบวนการเปื่อยกสลับแห้งจะส่งผลให้มีความความหนาแน่นลดลงและส่งค่าความเร็วคลื่น P-wave ลดลง

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

ผลการทดสอบ P-wave และ S-wave ควรเป็นตัวอย่างชุดเดียวกันตลอดกระบวนการทดสอบเพื่อให้ทราบถึงผลที่แน่ชัดและเพื่อพิสูจน์สมมติฐานในงานวิจัยนี้แนะนำให้ใช้การทดสอบ SEM, XRD เพื่อศึกษาโครงสร้างระดับ Microstructures ของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์เพิ่มเติม





บรรณานุกรม

- Ahmad, F., Atemimi, Y., & Mohamad Ismail, M. A. (2013). Evaluation the effects of styrene butadiene rubber addition as a new soil stabilizer on geotechnical properties. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18, 735-748.
- Baghini, M. S., Ismail, A., Naserlavi, S. S., & Firoozi, A. A. (2016). Performance evaluation of road base stabilized with styrene-butadiene copolymer latex and Portland cement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(4), 321-336. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.08.006>
- Carret, J.-C., Lamothe, S., Hounkponou, S. E., & Carter, A. (2021). Effects of pre-cracking on the early-age mechanical properties of a cement-treated base material mixed and tested in laboratory. *Construction and Building Materials*, 303, 124488. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124488>
- Chitinchee. (2016, 28-30 June 2016). *Study of Optimum Shear Wave Velocity for Cement Stabilized Base and Subbase Construction using Free-Free Resonance Test* The 21 National Covention on Civil Engineering
Songkhla, Thailand.
- Dong, S., Hao, p., Wang, J., Bi, J., & Zhang, M. (2021). A novel method for testing the fatigue performance of cement stabilized base field coring samples. *Construction and Building Materials*, 274, 122065. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122065>
- Fedrico, W., Núñez, W. P., Kleinert, T. R., Matuella, M. F., & Ceratti, J. A. P. (2017). Strength, shrinkage, erodibility and capillary flow characteristics of cement-treated recycled pavement materials. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(5), 393-402. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.06.001>
- Georgees, R., Hassan, R., Evans, R., & Jegatheesan, P. (2015). Effect of the Use of a Polymeric Stabilizing Additive on Unconfined Compressive Strength of Soils. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*,

- 1, 200-208. <https://doi.org/10.3141/2473-23>
- Gnanendran, C., & Jegatheesan, P. (2008). Characterisation of a lightly stabilised granular material by indirect diametrical tensile testing. *International Journal of Pavement Engineering*, 9, 445-456. <https://doi.org/10.1080/10298430802342732>
- Gowthaman, S., Nakashima, K., & Kawasaki, S. (2021). Effect of wetting and drying cycles on the durability of bio-cemented soil of expressway slope. *International journal of Environmental Science and Technology*, 19. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03306-1>
- Guimond-Barrett, A., Nauleau, E., Le Kouby, A., Anne, P., Reiffsteck, P., & Martineau, F. (2013). Free-Free Resonance Testing of In Situ Deep Mixed Soils. *Geotechnical Testing Journal*, 36. <https://doi.org/10.1520/GTJ20120058>
- Guthrie, S., Sebes-Reactiota, S., & Scullion, T. (2002). Selecting optimum cement contents for stabilizing aggregate base materials. *Nat. Tech. Inf. Serv.*, 8-72.
- Hardkao Iradaporn., & Nusit Korakod. (2020, July 15-17, 2020). *Engineering Characteristics of Rubber-modified and Styrene Acrylic-modified Cemented Soil* The 25 National Convention on Civil Engineering Chonburi, THAILAND
- Hardkao Iradaporn., Nusit Korakod., Khumkud Nattanon., Suriyawut P., Thanawat P., Peerapong J., & Suriyawut P. (2021, 23-25 June 2021). *THE STUDY OF THE PROPERTIES OF THE CEMENT POLYMER-STABILIZED ROAD MATERIALS* The 26th National Convention on Civil Engineering, Online Conference
- Hie, T., Zahran, E.-S., & Tan, S. J. (2020). *A review of chemical stabilisation in road construction* (Vol. 943). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/943/1/012005>
- Kassab, M., & Weller, A. (2015). Study on P-wave and S-wave velocity in dry and wet sandstones of Tushka region, Egypt. *Egyptian Journal of Petroleum*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.02.001>
- Kavak, A., Bilgen, G., & Mutman, U. (2010). In-situ modification of a road material using a special polymer. *Scientific Research and Essays*, 5, 2547-2555.
- Khoury, N., & Zaman, M. (2007). Durability of stabilized base courses subjected to wet-dry cycles. *International Journal of Pavement Engineering - INT J PAVEMENT ENG*, 8, 265-276. <https://doi.org/10.1080/10298430701342874>
- Khumkud, N. (2022, 24-26 Aug 2022). The Prediction of Cement-Polymer Stabilized

Road Base Strength from the Free-free Resonance Testing Result. The 27th National Convention on Civil Engineering thailand.

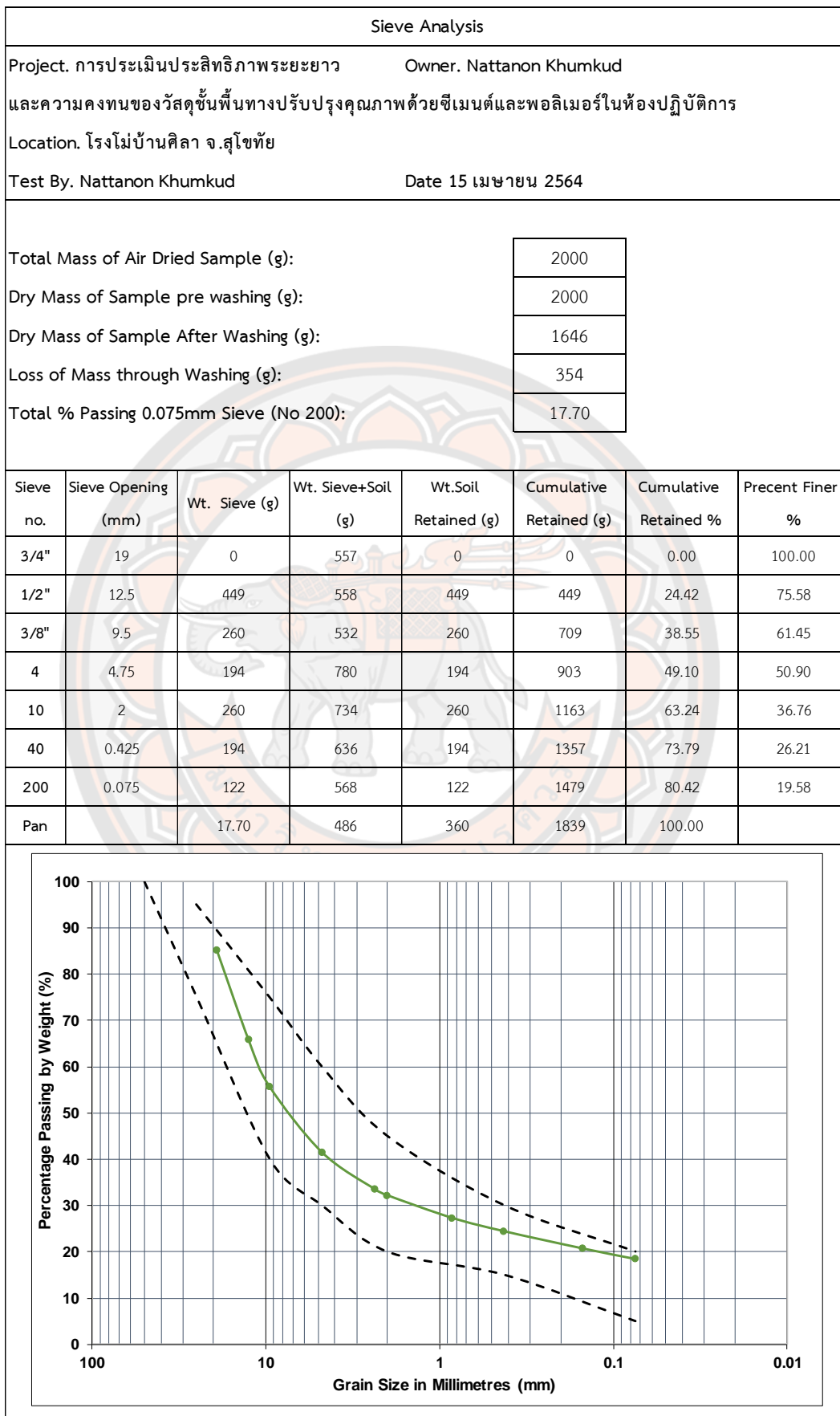
- Kolay, P., & Dhakal, B. (2020). Geotechnical Properties and Microstructure of Liquid Polymer Amended Fine-Grained Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01163-x>
- Li, Y., Metcalf, J., Romanoschi, S., & Rasoulia, M. (1999). Performance and Failure Modes of Louisiana Asphalt Pavements with Soil-Cement Bases Under Full-Scale Accelerated Loading. *Transportation Research Record*, 1673, 9-15. <https://doi.org/10.3141/1673-02>
- Mazari, M., Garibay, J., Abdallah, I., & Nazarian, S. (2015). Effects of Moisture Variation on Resilient and Seismic Moduli of Unbound Fine-Grained Materials. <https://doi.org/10.1061/9780784479216.078>
- Nusit, K., & Jitsangiam, P. (2016). Damage Behavior of Cement-Treated Base Material. *Procedia Engineering*, 143, 161-169. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.021>
- Paige-Green, P. (1998). Recent Developments in Soil Stabilization. *Proceedings of the Conference of the Australian Road Research Board*, 121-135.
- PRC, M. o. c. o. (2005). JTG E42-2005. In *Test Methods of Aggregate for Highway Engineering (JTG E42-2005)* Ministry of Communications of the People's Republic of China.
- Ryden, N., Ekdahl, U., & Lindh, P. (2006). *Quality Control of Cement Stabilised Soil Using Non-destructive Seismic Tests*.
- saleewong, K. (2020, July 15-17, 2020). *Improvement of Sub-Standard Lateritic Soil with Cement-Polymer Mixtures* The 25 National Convention on Civil Engineering, Chonburi, THAILAND
- Scullion, T., Uzan, J., Hilbrich, S., & Chen, P. (2021). Thickness Design Systems for Pavements Containing Soil-Cement Bases.

- Shojaei Baghini, M., Ismail, A., Karim, M. R., Shokri, F., & Firoozi, A. A. (2014). Effect of styrene–butadiene copolymer latex on properties and durability of road base stabilized with Portland cement additive. *Construction and Building Materials*, *68*, 740-749. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.061>
- Shutao, M., Liufu, H., Daoxin, W., Jinan, S., Engineer, S., & Yongqi, L. (2021). THE PERFORMANCE OF STABILIZED BASE PAVEMENTS UNDER ACCELERATED LOADING.
- Taher, Z., Scalia, J., & Bareither, C. (2020). Comparative assessment of expansive soil stabilization by commercially available polymers. *Transportation Geotechnics*, *24*, 100387. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100387>
- Von Quintus, H., Mallela, J., Jiang, J., & Buncher, M. (2007). Expected Service Life of Hot-Mix Asphalt Pavements in Long-Term Pavement Performance Program. *Transportation Research Record*, *1990*, 102-110. <https://doi.org/10.3141/1990-12>
- Wen, H., Muhunthan, B., Wang, J., Li, X., Edil, T., & Tinjum, J. M. (2014). *Characterization of Cementitiously Stabilized Layers for Use in Pavement Design and Analysis* (789, Issue).
- Xie, H. C., & Ling, J. M. (2008). Method to predict resilient moduli of lime and lime-cement stabilized soils used in highway subgrades. *Jianzhu Cailiao Xuebao/Journal of Building Materials*, *11*, 441-445.
- Yeo R., V. B. a. A. A. (2002). *Towards National Test Methods for Stiffness and Fatigue Characterisation of Stabilised Materials* (Report RC2028- 002 for Austroads, Issue).
- Zaman, M., Zhu, J.-H., & Laguros, J. (1999). Durability Effects on Resilient Moduli of Stabilized Aggregate Base. *Transportation Research Record*, *1687*, 29-38. <https://doi.org/10.3141/1687-04>
- Zhu, Y., Yu, X., Gao, L., Chen, J., & Cotugno, M. (2019). Unconfined Compressive Strength of Aqueous Polymer-Modified Saline Soil. *International Journal of Polymer Science*, *2019*, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2019/9137069>



ภาคผนวก ก.

คุณสมบัติของวัสดุหินคลุก



LIQUID & PLASTIC LIMITS								
Project. การประเมินประสิทธิภาพระยะยาว					Owner. Nattanon Khumkud			
และความคงทนของวัสดุชั้นพื้นทางปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ในห้องปฏิบัติการ								
Location. โรงไม้บ้านศิลา จ.สุโขทัย								
Test By. Nattanon Khumkud					Date 15 เมษายน 2564			
TEST	LIQUID LIMIT				PLASTIC LIMIT			
TRIAL NO.	1	2	3	4	1	2	3	4
TARE NO.								
NUMBER OF BLOWS	20	30	28	40				
WEIGHT OF WET SOIL + TARE (gm.)	37.89	54.00	46.69	42.74	26.62	19.96	19.96	17.44
WEIGHT OF DRY SOIL + TARE (gm.)	34.18	47.80	41.28	38.28	26.42	19.59	19.63	17.38
WEIGHT OF WATER (gm.)	3.72	6.20	5.41	4.46	0.20	0.37	0.33	0.06
WEIGHT OF TARE (gm.)	19.70	20.71	17.91	17.38	25.38	17.42	17.60	17.04
WEIGHT OF DRY SOIL (gm.)	14.48	27.09	23.37	20.90	1.03	2.17	2.03	0.34
WATER CONTENT (%)	25.67	22.89	23.15	21.33	19.63	16.84	16.40	17.35
					PL. =	17.55		
<p>The chart plots water content (%) on the y-axis (20.00 to 27.00) against the number of blows (ครั้ง) on the x-axis (1 to 100). A blue line connects four data points: (20, 25.67), (30, 22.89), (28, 23.15), and (40, 21.33). A horizontal red line is drawn at 17.55% water content, representing the Plastic Limit (PL). A vertical red line is drawn at 25 blows, representing the Liquid Limit (LL) test condition. The intersection of the flow curve and the PL line is at 24.20% water content. The Plastic Index (P.I.) is calculated as 24.20% - 17.55% = 6.65%.</p>					LIQUID LIMIT = 24.20 PLASTIC LIMIT = 6.65 P.I. = 17.55			
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณความชื้น (%) กับ จำนวนครั้งที่เคาะ (ครั้ง)								

ผลการทดสอบความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion			
Source	โรงไม้หินสุวรรณภูมิ สุโขทัย		
Material	หินคลุก	Norminal size	3/4"-1/2", 1/2"-3/8"
Grading	B	Number of revolutions	500
Number of abrasive charges	11	Weight of charges	4,584 gm.
Sieve size		Acoumulative Weight of sample	
Passing	Retained on		
3/4"	1/2"	2,500 gm.	
1/2"	3/8"	2,500 gm.	
Original weight of sample (W ₁)		5,000 gm.	
Final weight of sample (W ₂)		3,429 gm.	
Loss (W ₁ - W ₂)		1,571 gm.	
Percentage of wear = $\frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$		31.4% < 40	

Soundness test of aggregate						
Sample หินคลุก						
Source โรงโม่บ้านศิลา จ.สุโขทัย						
Quantitative Examination			Fine 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	7.7	100	92	8	8.00	0.62
4.75 - 2.36	7.7	100	93	7	7.00	0.54
2.36 - 1.18	7.7	100	96	4	4.00	0.31
1.18 - 0.60	7.7	100	93	7	7.00	0.54
0.60 - 0.30	7.7	100	97	3	3.00	0.23
					Total % Loss	2.23
2. Solution		Sodium Sulfate				
3. Number of Cycles		5 Cycles				
Soundness test of aggregate						
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	330	329	1	0.30	0.08
19.0-12.5	51.54	670.00	668.00	2	0.30	0.15
					Total % Loss	1.77
2. Solution		Sodium Sulfate				
3. Number of Cycles		5 Cycles				

Project : การประเมินประสิทธิภาพระยะยาวและความคงทนของวัสดุชั้นพื้นทาง

ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ในห้องปฏิบัติการ

Soil type : หินคลุก

Date: 18/3/2564

Blows/Layer : 25 No. of Layer : 5

Mold dimensions : Diam. 101.6 mm.

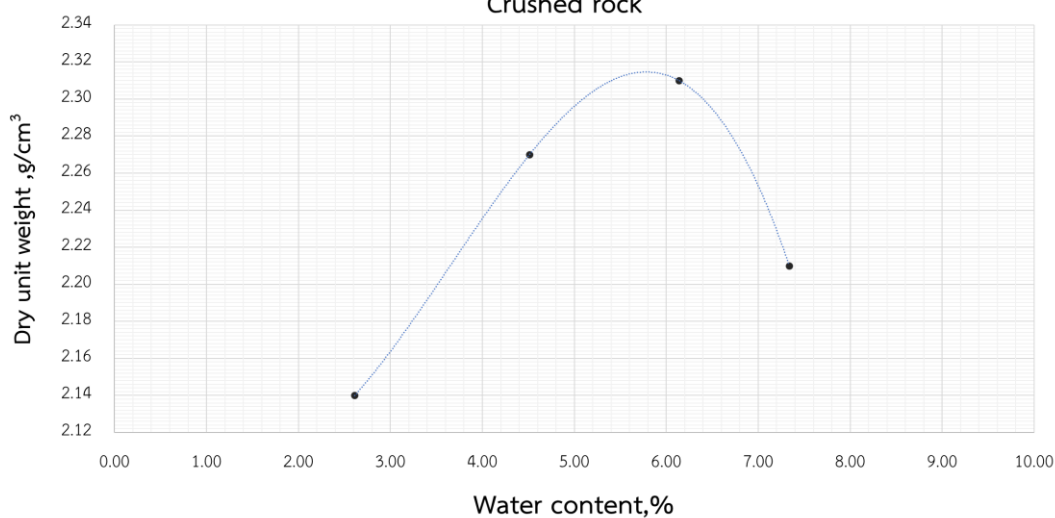
Vol. : 943.69 cm³ H. : 116.4 mm.

Assume	2.00	4.00	6.00	8.00
Sample no.	1.00	1.00	1.00	1.00
cup + wet soil,g	128.32	202.49	159.91	161.83
cup + dry soil,g	125.46	194.49	151.64	151.97
Mass of water	2.86	8.00	8.27	9.86
Mass of cup ,g	15.94	17.21	16.86	17.60
Mass of dry soil ,g	109.52	177.28	134.78	134.37
Water content,%	2.61	4.51	6.14	7.34

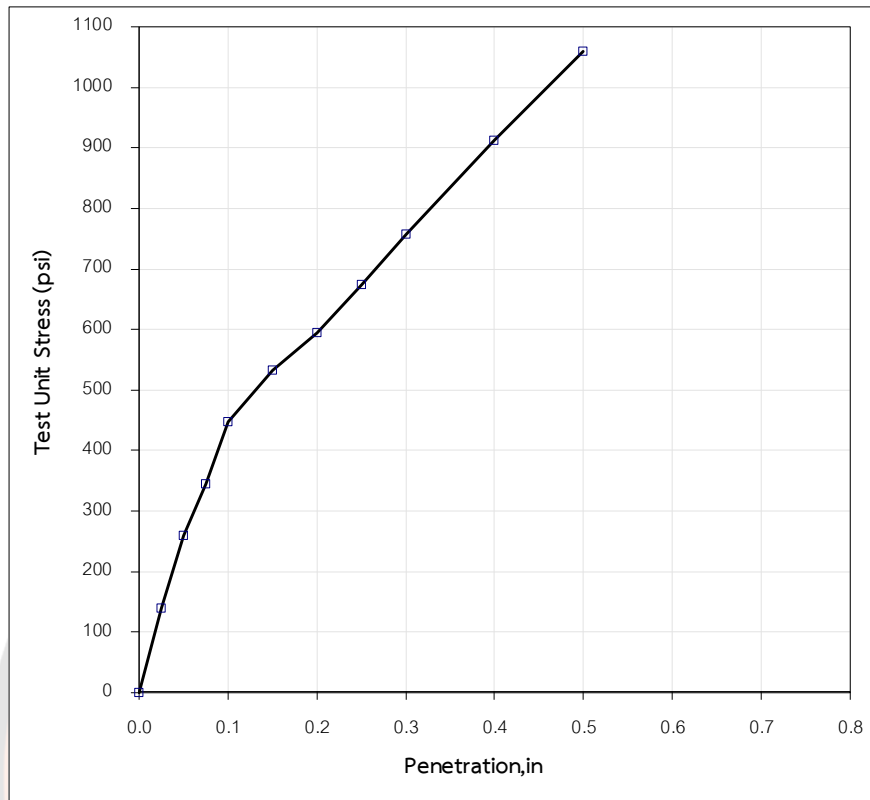
Assume	2.00	2.00	2.00	2.00
Average Water content, %	2.61	4.51	6.14	7.34
soil + mold ,g	5755	5917	5996	5924
mold ,g	3688	3688	3688	3688
Mass of soil in mold, g	2067	2229	2308	2236
wet unit weight, g/cm ³	2.19	2.36	2.45	2.37
Dry unit weight ,g/cm ³	2.14	2.27	2.31	2.21

Compaction Test

Crushed rock

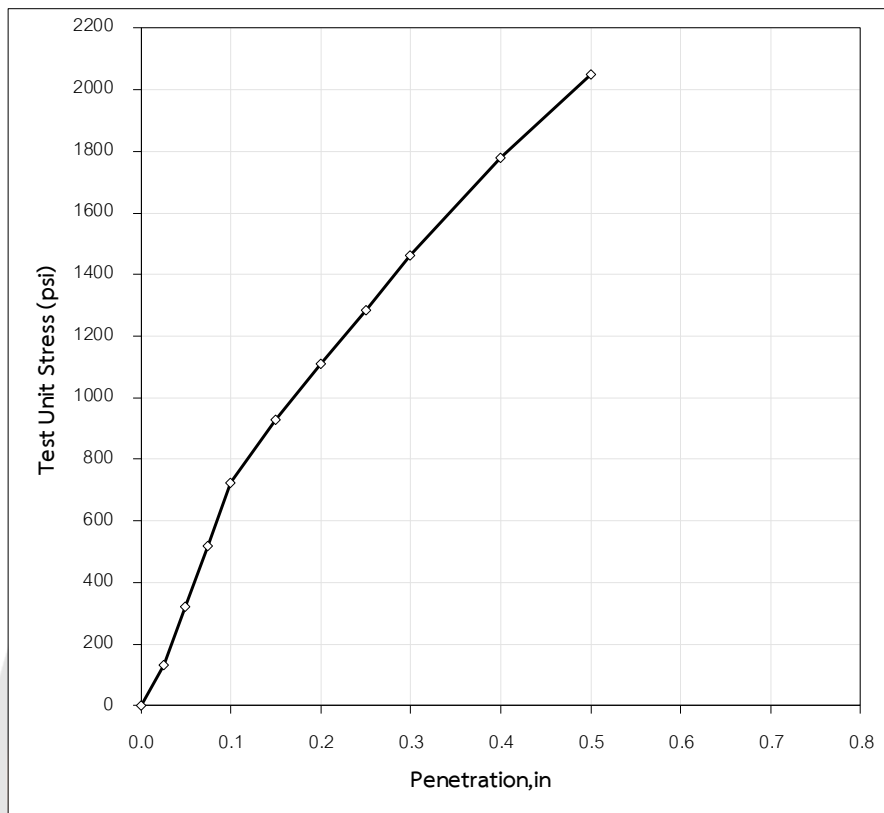


CRB TEST								
Project การประเมินประสิทธิภาพระยะยาวและความคงทนของวัสดุชั้นพื้นทาง ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ในห้องปฏิบัติการ								
Owner Nattanon Khumkud				Soil Description หินคลุก				
Location		Sample Number		Date		20-22/3/2564		
Type Soaked								
Mold DIA. (cm)	15.296	HT. (cm)	11.415	VOL.(cm ³)	2097.595	WT.(gm)	7006	
WT.Of Hammer.(lb)	10	No. Of Blows	12	HT.Of Drop	18	No. Of Laye	5	
Density Determination:								
Tare No.		Before Soaked	After Soaked					
WT.Of Mold+Wet Soil	(g)	11444	11486					
WT.Of Wet Soil	(g)	4438	4480					
Wet Density	(g/cm ³)	2.12	2.14					
Dry Density	(g/cm ³)	2.03	2.04					
Water Content:				Swell Data.				
WT.Of Tare	(g)	19.72	17.38	Date	Elapse Time	Swelling(mm)	%Swell	
WT.Of Tare+Wet Soil	(g)	131.08	173.27	20/3/2021	0 hr	0	0	
WT.Of Tare+Dry Soil	(g)	126.75	165.96	21/3/2021	24 hr	0	0.00	
WT.Of Water	(g)	4.33	7.31	22/3/2021	48 hr	0	0.00	
WT.Of Dry Soil	(g)	107.03	148.58		72 hr			
Water Content:	(%)	4.05	4.92					
CBR Load Test DATA:								
Penetration,in	Penetration ,mm	Type Soaked		Piston Area	3 in ²			
		Date	22-มี.ค.-64	Loading Ring Constant	=2.5t kg/div			
		Dial		Loading				
		Reading	Load (psi)	Ring	5.7011541 lb/div			
		(div)		Constant,				
		0	0	0	0			
		0.025	0.63	73	138.728			
		0.05	1.27	136	258.452			
		0.075	1.9	181	343.970			
		0.1	2.54	235	446.590			
		0.15	3.17	280	532.108			
0.2	3.81	313	594.820					
0.25	4.44	355	674.637					
0.3	5.08	399	758.253					
0.4	6.35	480	912.185					
0.5	7.62	558	1060.415					



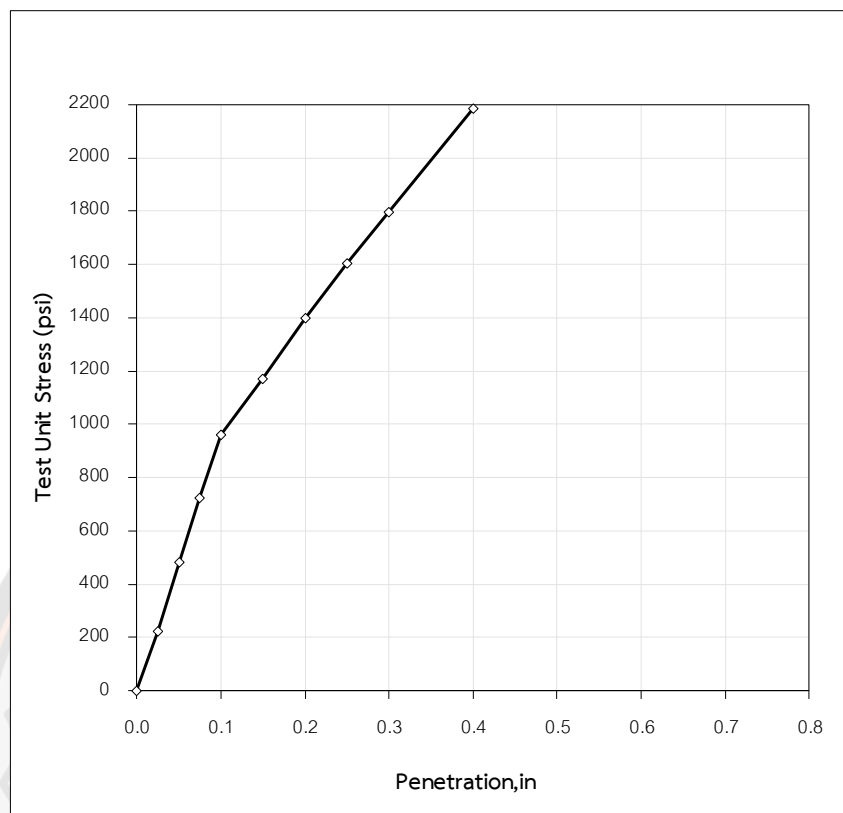
Result			
Penetration,in	Standard Unit Stress (lb/in ²)	Test Unit Stress (lb/in ²)	CBR %
0.1	1000	446.59	44.66
0.2	1500	594.82	39.65

Type Soaked							
Mold DIA. (cm)	15.21	HT. (cm)	11.43	VOL.(cm ³)	2076.799	WT.(gm)	6930
WT.Of Hammer.(lb)	10	No. Of Blows	25	HT.Of Drop	18	No. Of Laye	5
Density Determination:							
Tare No.		Before Soaked	After Soaked				
WT.Of Mold+Wet Soil	(g)	11686	11728				
WT.Of Wet Soil	(g)	4756	4798				
Wet Density	(g/cm ³)	2.29	2.31				
Dry Density	(g/cm ³)	2.18	2.19				
Water Content:				Swell Data.			
WT.Of Tare	(g)	25.2	25.19	Date	Elapse Time	Swelling(mm)	%Swell
WT.Of Tare+Wet Soil	(g)	149.35	150.04	20/3/2021	0 hr	0	0
WT.Of Tare+Dry Soil	(g)	143.4	143.6	21/3/2021	24 hr	0	0.00
WT.Of Water	(g)	5.95	6.44	22/3/2021	48 hr	0	0.00
WT.Of Dry Soil	(g)	118.2	118.41		72 hr	0	0.00
Water Content:	(%)	5.03	5.44				
CBR Load Test DATA:							
Penetration,in	Penetration ,mm	Type Soaked		Piston Area 3 in ²			
		Date	22-มี.ค.-64	Loading Ring Constant=2.58 kg/div			
		Dial Reading (div)	Load (psi)	Loading Ring Constant, 5.7011541 lb/div			
0	0	0	0				
0.025	0.63	71	134.93				
0.05	1.27	170	323.07				
0.075	1.9	273	518.81				
0.1	2.54	381	724.05				
0.15	3.17	489	929.29				
0.2	3.81	585	1111.73				
0.25	4.44	676	1284.66				
0.3	5.08	769	1461.40				
0.4	6.35	937	1780.66				
0.5	7.62	1079	2050.52				



Result			
Penetration,in	Standard Unit Stress (lb/in ²)	Test Unit Stress (lb/in ²)	CBR %
0.1	1000	724.05	72.40
0.2	1500	1111.73	74.12

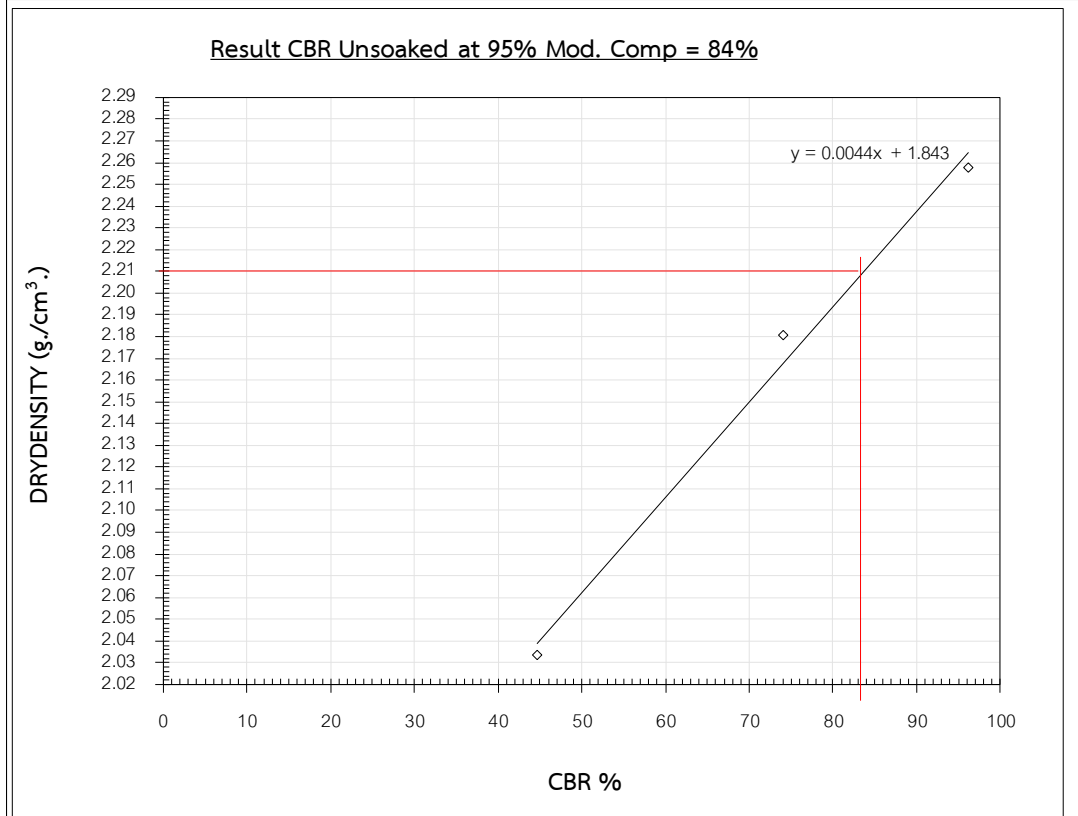
Type Soaked							
Mold DIA. (cm)	15.195	HT. (cm)	11.41	VOL.(cm ³)	2069.078	WT.(gm)	6849
WT.Of Hammer.(lb)	10	No. Of Blows	56	HT.Of Drop	18	No. Of Laye	5
Density Determination:							
Tare No.		Before Soaked	After Soaked				
WT.Of Mold+Wet Soil	(g)	11733	11761				
WT.Of Wet Soil	(g)	4884	4912				
Wet Density	(g/cm ³)	2.36	2.37				
Dry Density	(g/cm ³)	2.26	2.27				
Water Content:				Swell Data.			
WT.Of Tare	(g)	24.88	25.15	Date	Elapse Time	Swelling(mm)	%Swell
WT.Of Tare+Wet Soil	(g)	145.23	171.21	20/3/2021	0 hr	0	0
WT.Of Tare+Dry Soil	(g)	139.98	164.58	21/3/2021	24 hr	0	0.00
WT.Of Water	(g)	5.25	6.63	22/3/2021	48 hr	0	0.00
WT.Of Dry Soil	(g)	115.1	139.43		72 hr	0	0.00
Water Content:	(%)	4.56	4.76				
CBR Load Test DATA:							
Penetration,in	Penetration ,mm	Type Soaked		Piston Area 3 in ²			
		Date	22-มี.ค.-64	Loading Ring Constant=2.58 kg/div			
		Dial Reading (div)	Load (psi)	Loading Ring Constant, 5.7011541 lb/div			
0	0	0	0.00				
0.025	0.63	118	224.25				
0.05	1.27	254	482.70				
0.075	1.9	382	725.95				
0.1	2.54	506	961.59				
0.15	3.17	616	1170.64				
0.2	3.81	737	1400.58				
0.25	4.44	845	1605.83				
0.3	5.08	946	1797.76				
0.4	6.35	1150	2185.44				
0.5	7.62						



Result			
Penetration,in	Standard Unit Stress (lb/in ²)	Test Unit Stress (lb/in ²)	CBR %
0.1	1000	961.59	96.16
0.2	1500	1400.58	93.37

100%	Modified compaction test	พล.-ล 108/2517	=	2.33	g/cm ³
95%	Modified compaction test	พล.-ล 108/2517	=	2.21	g/cm ³
O.M.C. =	5.5	%	watercontent of (molding)	CBR =	84 %

Required CBR ≥25%





ภาคผนวก ข.

การออกแบบอัตราส่วนผสม

ผลการทดสอบหาปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม

Project : การประเมินประสิทธิภาพระยะยาวและความคงทนของวัสดุชั้นพื้นทาง

ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ในห้องปฏิบัติการ

Soil type : หินคลุก

Date: 18/3/2564

Blows/Layer :

25

No. of Layer :

5

Mold dimensions : Diam.

101.6

mm.

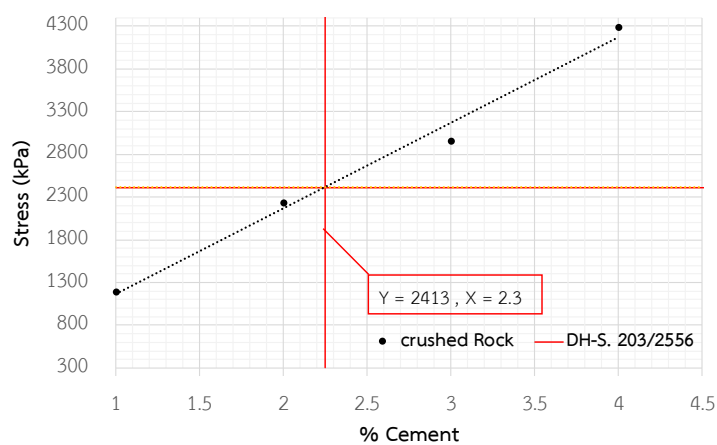
Vol. :

943.69

cm³

H. : 116.4 mm.

	Stress (kPa)	Strain
Cement 1%	1187.69	0.028
Cement 2%	2236.44	0.026
Cement 3%	2961.32	0.023
Cement 4%	4284.77	0.016



ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุ PMC

Project : การประเมินประสิทธิภาพระยะยาวและความคงทนของวัสดุชั้นพื้นทาง

ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ในห้องปฏิบัติการ

Soil type : PMC

Date: 18/3/2564

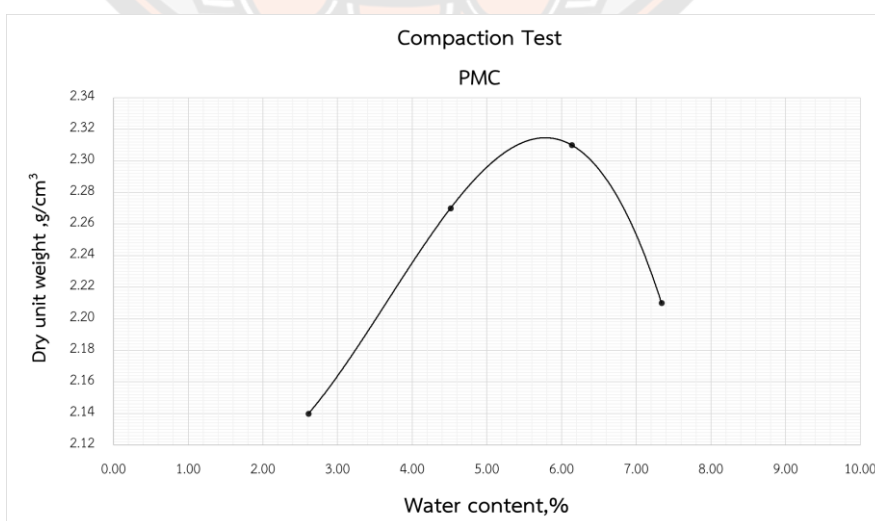
Blows/Layer : 25 No. of Layer : 5

Mold dimensions : Diam. 101.6 mm.

Vol. : 943.69 cm³ H. : 116.4 mm.

Assume	2.00	4.00	6.00	8.00
Sample no.	1.00	1.00	1.00	1.00
cup + wet soil,g	128.32	202.49	159.91	161.83
cup + dry soil,g	125.46	194.49	151.64	151.97
Mass of water	2.86	8.00	8.27	9.86
Mass of cup ,g	15.94	17.21	16.86	17.60
Mass of dry soil ,g	109.52	177.28	134.78	134.37
Water content,%	2.61	4.51	6.14	7.34

Assume	2.00	2.00	2.00	2.00
Average Water content, %	2.61	4.51	6.14	7.34
soil + mold ,g	5755	5917	5996	5924
mold ,g	3688	3688	3688	3688
Mass of soil in mold, g	2067	2229	2308	2236
wet unit weight, g/cm ³	2.19	2.36	2.45	2.37
Dry unit weight ,g/cm ³	2.14	2.27	2.31	2.21



ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุ PMCSA

Project : การประเมินประสิทธิภาพระยะยาวและความคงทนของวัสดุชั้นพื้นทาง

ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ในห้องปฏิบัติการ

Soil type : PMCSA

Date: 18/3/2564

Blows/Layer : 25 of Layer : 5

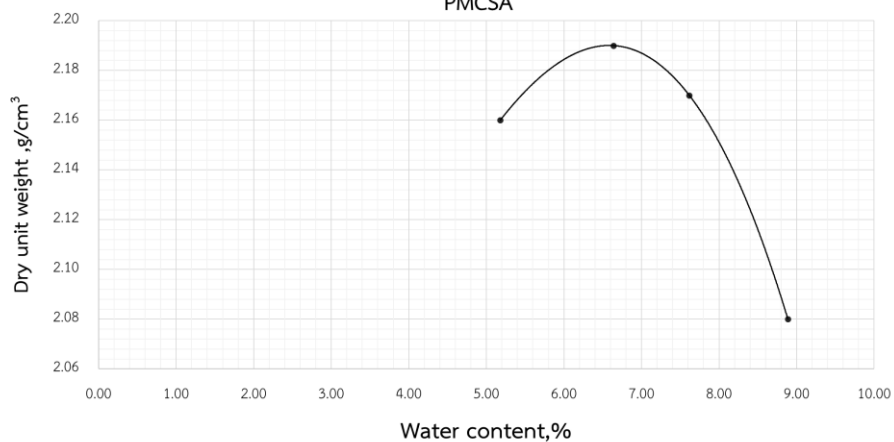
Mold dimensions : Diam. 101.6 mm.

Vol. : 943.69 cm³ H. : 116 mm.

Assume	6.00	8.00	10.00	12.00
Sample no.	1.00	1.00	1.00	1.00
cup + wet soil,g	161.38	158.25	164.11	165.11
cup + dry soil,g	154.25	150.04	154.27	153.23
Mass of water	7.13	8.21	9.84	11.88
Mass of cup ,g	16.56	26.35	25.08	19.56
Mass of dry soil ,g	137.69	123.69	129.19	133.67
Water content,%	5.18	6.64	7.62	8.89
Average Water content, %	5.18	6.64	7.62	8.89
soil + mold ,g	5829.00	5886.00	5891.00	5820.00
mold ,g	3688.00	3688.00	3688.00	3688.00
Mass of soil in mold, g	2141.00	2198.00	2203.00	2132.00
wet unit weight, g/cm ³	2.27	2.33	2.33	2.26
Dry unit weight ,g/cm ³	2.16	2.19	2.17	2.08

Compaction Test

PMCSA



ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุ PMCSBR

Project : การประเมินประสิทธิภาพระยะยาวและความคงทนของวัสดุชั้นพื้นทาง
ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ในห้องปฏิบัติการ

Soil type : PMCSBR

Date: 18/3/2564

Blows/Layer : 25

No. of Layer : 5

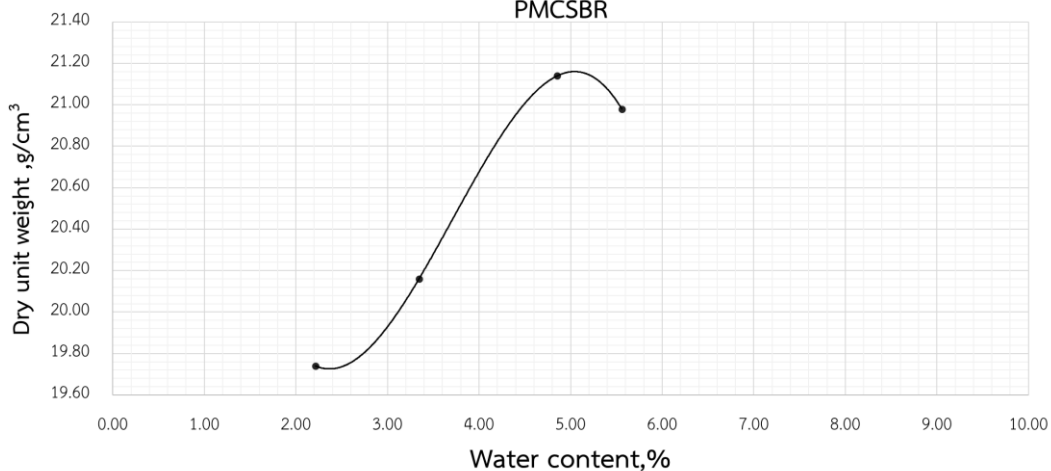
Mold dimensions : Diam. 101.6 mm.

Vol. : 943.69 cm³ H. : 116.4 mm.

Assume	2.00	4.00	6.00	8.00
Sample no.	1	1	1	1
cup + wet soil,g	197.620	198.380	181.420	169.450
cup + dry soil,g	193.900	192.510	174.200	161.900
Mass of water	3.720	5.870	7.220	7.550
Mass of cup ,g	26.020	16.950	25.460	26.080
Mass of dry soil ,g	167.880	175.560	148.740	135.820
Water content,%	2.22	3.34	4.85	5.56
Average Water content, %	2.22	3.34	4.85	5.56
soil + mold ,g	5737	5804	5940	5937
mold ,g	3688	3688	3688	3688
Mass of soil in mold, g	2049	2116	2252	2249
wet unit weight, g/cm ³	20.17	20.83	22.17	22.14
Dry unit weight ,g/cm ³	19.74	20.16	21.14	20.98

Compaction Test

PMCSBR





ภาคผนวก ค.

การดำเนินงานรับแรงของวัสดุ

ผลการทดสอบกำลังรับกำลังอัดแกนเดียวและผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่น P-wave และ S-wave (วัสดุ PMC)

cycle	Cement	Dry unit weight		UCS	Vp (m/s)	Vs (m/s)
			g/cm3			
0	Control	0CR1	2.30	1364.77	1385.2026	887.2848
		0CR2				
		0CR3	2.31	1425.03	1657.7248	1191.8592
3	Control	3CR1	2.31	2035.53	1674.2784	1075.984
		3CR2	2.28	1986.35	1847.9338	1300.4864
		3CR3	2.30	1921.70	1732.64	1254.26
6	Control	6CR1	2.30	2193.00	1787.504	1309.727
		6CR2				
		6CR3	2.31	2261.02	1912.6624	1386.7392
9	Control	9CR1	2.29	2234.82	1859.9616	1330.9164
		9CR2	2.32	2250.77	1891.7736	1364.1684
		9CR3				
12	Control	12CR1		2264.13	1941.9318	1318.5072
		12CR2	2.31	2274.01	1955.7	1421.46
		12CR3				
0	soak	0CR1	2.30	1364.77	1385.2026	887.2848
		0CR2				
		0CR3	2.31	1425.03	1657.7248	1191.8592
3	soak	3CR7	2.28	2127.54	1140.4976	951.9856
		3CR8	2.31	1713.19	1148.0292	1013.3838
		3CR9	2.30	2477.45	1212.5268	990.3484
6	soak	6CR7	2.33	2421.04	1174.14	913.22
		6CR8	2.32	2671.43	1146.6928	950.0492
		6CR9	2.32	2532.43	1184.7	919.3272
9	soak	9CR7	2.33	1962.87	1207.1096	971.8658
		9CR8	2.32	2451.57	1257.478	982.2564
		9CR9	2.30	2340.67	1231.0056	1033.56
12	soak	12CR7	2.31	2007.08	1277.824	963.136
		12CR8				
		12CR9	2.28	2142.50	1327.938	1009.137
0	W-D	0CR1	2.30	1364.77	1385.2026	887.2848
		0CR2				
		0CR3	2.31	1425.03	1657.7248	1191.8592
3	W-D	3CR4	2.31	2287.30	1149.7904	935.9864
		3CR5	2.31	2167.86	1143.8856	938.2698
		3CR6	2.32	2101.77	1242.5434	1000.2118
6	W-D	6CR4	2.32	2112.78	1172.847	896.883
		6CR5	2.32	2366.88	1198.0056	961.2456
		6CR6	2.29	2691.12	1189.073	1021.8964
9	W-D	9CR4	2.32	2177.41	1241.0416	1037.3592
		9CR5	2.32	1848.71	1258.2794	1041.8268
		9CR6	2.29	2349.63	1228.909	981.701
12	W-D	12CR4	2.29	1595.04	1062.966	896.506
		12CR5	2.30			
		12CR6	2.26	1702.68	1318.68	1028.5704

ผลการทดสอบกำลังรับกำลังอัดแกนเดียวและผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่น P-wave และ S-wave (วัสดุ PMCSA)

cycle	Cement+ SA 2%	Dry unit weight				
		g/cm3	UCS	Vp (m/s)	Vs (m/s)	
0	Control	0SA1	2.26	482.07	779.9224	610.062
		0SA2	2.25	488.93	613.0992	393.624
		0SA3	2.26	605.63	721.0552	460.8068
3	Control	3SA1	2.23	689.84	1076.888	761.412
		3SA2	2.26	613.48	781.952	626.992
		3SA3	2.29	707.30	1106.7264	685.792
6	Control	6SA1	2.30	973.55	1383.7992	710.7268
		6SA2	2.32	727.60	972.615	657.045
		6SA3	2.29	690.46	905.0344	653.8992
9	Control	9SA1				
		9SA2	2.28	918.26	1122.7164	677.4196
		9SA3	2.26	950.38	1080.9486	742.1082
12	Control	12SA1	2.31	987.13	1065.992	730.228
		12SA2	2.31	896.84	904.704	650.256
		12SA3	2.26	992.15	1195.0708	852.6098
0	Control	0SA1	2.26	482.07	779.9224	610.062
		0SA2	2.25	488.93	613.0992	393.624
		0SA3	2.26	605.63	721.0552	460.8068
3	soak	3SA4	2.25	633.67	547.952	359.7424
		3SA5	2.24	878.41	716.8374	430.5756
		3SA6	2.22	701.10	569.568	441.4152
6	soak	6SA4	2.26	948.12	615.732	452.3262
		6SA5	2.22	523.64	539.0342	370.4376
		6SA6	2.24	845.07	575.4726	419.1714
9	soak	9SA4	2.20	664.99	414.0156	316.4602
		9SA5	2.18	675.35	421.2246	295.0952
		9SA6	2.22	883.06	408.6952	337.8232
12	soak	12SA4	2.18	596.51	619.424	474.0976
		12SA5	2.20	447.95	503.9154	293.3592
		12SA6	2.17	480.01	464.912	400.868
0	Control	0SA1	2.26	482.07	779.9224	610.062
		0SA2	2.25	488.93	613.0992	393.624
		0SA3	2.26	605.63	721.0552	460.8068
3	W-D	3SA7				
		3SA8	2.21	603.26	666.96	428.76
		3SA9	2.16	642.26	566.19	417.96
6	W-D	6SA7	2.21	682.13	626.1276	427.7742
		6SA8			305.6592	333.4464
		6SA9	2.18	720.55	809.6508	568.176
9	W-D	9SA7	2.15	592.91	340.9632	253.3546
		9SA8	2.13	578.64	405.9882	308.646
		9SA9				
12	W-D	12SA7	2.12	560.62	565.3452	375.3132
		12SA8	2.12	428.67	514.8976	294.2272
		12SA9				

ผลการทดสอบกำลังรับกำลังอัดแกนเดียวและผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่น P-wave และ S-wave (วัสดุ PMCSBR)

cycle	PMCSBR		Dry unit weight			
			g/cm ³	UCS	Vp (m/s)	Vs (m/s)
0	Control	0SBR1	2.31	1378.70	1356.6348	845.2332
		0SBR2	2.31	1437.10	1460.536	1005.304
		0SBR3	2.32	1621.24	1341.2752	956.367
3	Control	3SBR1	2.32	1726.58	1487.5194	1006.6098
		3SBR2	2.32	1638.86	1440.738	1124.766
		3SBR3	2.31	1633.00	1651.89	1038.06
6	Control	6SBR1	2.33	2348.54	1745.66	1311.604
		6SBR2	2.32	2295.46	1647.1236	1222.9716
		6SBR3				
9	Control	9SBR1	2.36	2303.00	1795.794	1287.104
		9SBR2	2.35	2362.14	1853.2184	1272.3238
		9SBR3				
12	Control	12SBR1	2.33	2250.00	1776.866	1232.686
		12SBR2	2.33	2390.00	1846.1456	1338.5736
		12SBR3	2.32	2417.59	1875.3028	1303.94
0	W-D	0SBR1	2.31	1378.70	1356.6348	845.2332
		0SBR2	2.31	1437.10	1460.536	1005.304
		0SBR3	2.32	1621.24	1341.2752	956.367
3	W-D	3SBR4	2.32	1664.72	706.238	470.038
		3SBR5	2.30	1482.66	904.0896	461.4624
		3SBR6	2.29	1517.10	921.2	627.45
6	W-D	6SBR4	2.30	1847.12	947.44604	632.7366
		6SBR5	2.31	2530.56	1092.4778	777.2944
		6SBR6	2.32	2040.19	1026.1234	673.0232
9	W-D	9SBR4	2.31	2121.36	989.35	723.8
		9SBR5	2.27	2115.97	932.976	579.576
		9SBR6	2.27	1840.65	1097.6164	791.4144
12	W-D	12SBR4				
		12SBR5	2.25	2053.50	1146.96	769.36
		12SBR6				
		12SBR6	2.25	2120.52	1166.2	916.3
0	Brushed	0SBR1	2.31	1378.70	1356.6348	845.2332
		0SBR2	2.31	1437.10	1460.536	1005.304
		0SBR3	2.32	1621.24	1341.2752	956.367
3	Brushed	3SBR7	2.29	2084.10	994.3178	663.6658
		3SBR8	2.29	1913.87	793.5648	668.3894
		3SBR9	2.27	1839.54	677.82	661.23
6	Brushed	6SBR7	2.30	1749.28	1095.819	749.3988
		6SBR8	2.27	1979.52	1152.069	757.7526
		6SBR9	2.27	1691.45	1052.959	574.9866
9	Brushed	9SBR7	2.29	2019.56	1129.05	841.3
		9SBR8	2.30	1612.13	1043.64	713.7
		9SBR9	2.27	2030.30	1165.824	805.4784
12	Brushed	12SBR7				
		12SBR8	2.27	1788.86	1077.5704	844.6552
		12SBR9	2.25	1628.58	1092.0552	915.6096

ผลการทดสอบกำลังรับกำลังรับแรงดึงทางอ้อมและผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่น P-wave และ S-wave (วัสดุ PMC)

cycle	<i>PMC</i>				
			IDT	Vp (m/s)	Vs (m/s)
0	Contral	0CR1	193.02	1422.821	954.2452
		0CR2	200.989	1579.968	973.6384
6	Contral	6CR1	361.7107	1648.938	1095.27
		6CR2	396.4837	1584.128	1099.571
12	Contral	12CR1	455.8257	1497.25	1062.65
		12CR2	392.7497	1704.448	1059.954
0	W-D	0CR1	193.02	1422.821	954.2452
		0CR2	200.989	1579.968	973.6384
6	W-D	6CR3	173.164	1157.559	788.097
		6CR4	212.785	1065.6	815.184
12	W-D	12CR3	314.2294	1321.677	797.769
		12CR4	329.8652	1194.296	781.4532
0	Brushed	0CR1	193.02	1422.821	954.2452
		0CR2	200.989	1579.968	973.6384
6	Brushed	6CR5	176.2208	1017.06	734.32
		6CR6	209.5667	999.9054	808.2906
12	Brushed	12CR5	264.1333	1228.513	826.551
		12CR6	252.9186	1134.012	753.346

ผลการทดสอบกำลังรับกำลังรับแรงดึงทางอ้อมและผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่น P-wave และ S-wave (วัสดุ PMCSA)

cycle	<i>PMCSA</i>				
			IDT	Vp (m/s)	Vs (m/s)
0	Contral	0SA1	198.7773	923.5906	548.006
		0SA2	194.1251	946.488	573.588
6	Contral	6SA1	207.655	1055.387	732.8328
		6SA2	199.8919	1046.405	721.0068
12	Contral	12SA1	207.5559	1031.885	775.2572
		12SA2	211.7683	1038.288	788.082
0	W-D	0SA1	198.7773	923.5906	548.006
		0SA2	194.1251	946.488	573.588
6	W-D	6SA3	140.9249	483.4432	374.0608
		6SA4	146.2207	502.2072	390.7548
12	W-D	12SA3	154.8822	579.64	517.632
		12SA4	165.6994	527.85	421.2
0	Brushed	0SA1	198.7773	923.5906	548.006
		0SA2	194.1251	946.488	573.588
6	Brushed	6SA5	138.9987	456.144	393.0888
		6SA6	140.7471	475.0242	389.8658
12	Brushed	12SA5	155.2568	576.6872	468.8952
		12SA6	133.2553	509.9824	405.0256

ผลการทดสอบกำลังรับกำลังรับแรงดึงทางอ้อมและผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่น P-wave และ S-wave (วัสดุ PMCSBR)

cycle	<i>PMCSBR</i>				
			IDT	Vp (m/s)	Vs (m/s)
0	Contral	0SBR1	291.1342	910.9352	634.0552
		0SBR2	283.9313	837.1128	589.9392
6	Contral	6SBR1	444.2354	1114.192	828.2608
		6SBR2	499.0705	1196.516	841.5944
12	Contral	12SBR1	633.2224	1304.813	1045.73
		12SBR2	540.7524	1247.4	881.55
0	W-D	0SBR1	291.1342	910.9352	634.0552
		0SBR2	283.9313	837.1128	589.9392
6	W-D	6SBR3	435.498	1024.05	793.1968
		6SBR4	420.8342	1001.32	823.3848
12	W-D	12SBR3	465.9625	1070.523	753.6474
		12SBR4	505.2167	1032.406	696.675
0	Brushed	0SBR1	291.1342	910.9352	634.0552
		0SBR2	283.9313	837.1128	589.9392
6	Brushed	6SBR5	391.0805	1011.899	730.5936
		6SBR6	366.0571	996.2004	805.2956
12	Brushed	12SBR5	391.119	899.91	639.936
		12SBR6	424.3252	925.9348	695.1182

ผลการทดสอบความคงทนต่อความล้าและผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่น P-wave และ S-wave (วัสดุ PMC)

cycle	<i>PMC</i>				
			fatigue life (n)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
0	Contral	0CR1	31	1422.821	954.2452
		0CR2	25	1579.968	973.6384
6	Contral	6CR1	81	1648.938	1095.27
		6CR2	35	1584.128	1099.571
12	Contral	12CR1	421	1497.25	1062.65
		12CR2	461	1704.448	1059.954
0	W-D	0CR1	31	1422.821	954.2452
		0CR2	25	1579.968	973.6384
6	W-D	6CR3	21	1157.559	788.097
		6CR4	21	1065.6	815.184
12	W-D	12CR3	11	1321.677	797.769
		12CR4	11	1194.296	781.4532
0	Brushed	0CR1	31	1422.821	954.2452
		0CR2	25	1579.968	973.6384
6	Brushed	6CR5	10	1017.06	734.32
		6CR6	8	999.9054	808.2906
12	Brushed	12CR5	4	1228.513	826.551
		12CR6	4	1134.012	753.346

ผลการทดสอบความคงทนต่อความล้าและผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่น P-wave และ S-wave (วัสดุ PMCSA)

cycle	<i>PMCSA</i>				
			fatigue life (n)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
0	Contral	0SA1	198.7773048	804.524	391.3532
		0SA2	194.1251126	814.956	302.388
6	Contral	6SA1	207.6550328	920.8364	407.7604
		6SA2	199.8918851	923.38	496.064
12	Contral	12SA1	207.5558523	974.8332	557.436
		12SA2	211.7682558	823.0104	545.04
0	W-D	0SA1	198.7773048	804.524	391.3532
		0SA2	194.1251126	814.956	302.388
6	W-D	6SA3	140.9249271	520.2054	391.3252
		6SA4	146.2206959	423.6264	393.1696
12	W-D	12SA3	154.8822024	488.598	382.264
		12SA4	165.6993721	459.62	392.62
0	Brushed	0SA1	198.7773048	804.524	391.3532
		0SA2	194.1251126	814.956	302.388
6	Brushed	6SA5	138.9986751	376.0228	282.601
		6SA6	140.7471361	477.108	370.17
12	Brushed	12SA5	155.2567954	509.6034	427.5828
		12SA6	133.2552697	502.5064	404.4236

ผลการทดสอบความคงทนต่อความล้าและผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่น P-wave และ S-wave (วัสดุ PMCSBR)

cycle	<i>PMCSBR</i>				
			fatigue life (n)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
0	Contral	0SBR1	191	1157.358	870.7876
		0SBR2	91	1167.381	788.22
6	Contral	6SBR1	221	1038.008	365.5708
		6SBR2	201	1117.054	603.849
12	Contral	12SBR1	1451	1174.5	812.7
		12SBR2	1397	1201.536	852.096
0	soak	0SBR1	191	1157.358	870.7876
		0SBR2	91	1167.381	788.22
6	soak	6SBR3	30	849.4416	379.3104
		6SBR4	21	618.3648	381.2576
12	soak	12SBR3	81	1001.7	464.4
		12SBR4	76	1056.384	463.68
0	W-D	0SBR1	191	1157.358	870.7876
		0SBR2	91	1167.381	788.22
6	W-D	6SBR5	21	727.92	404.4
		6SBR6	21	712.5196	418.5714
12	W-D	12SBR5	20	835.084	442.888
		12SBR6	5.5	826.176	415.736



ภาคผนวก ง.

การทดสอบด้านความคงทนของวัสดุ

ผลการทดสอบความคงทนของวัสดุโดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying Test) ของวัสดุ PMC

Cycle	น้ำหนักเริ่มต้น	Brushed										W-D		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	6	7	8	9
1	น้ำหนัก	2268	2290	2251	2265	2297	2250	2272	2253	2250	2272	2253	2250	2250
	หลังอบ	2267	2289	2250	2264	2296	2249	2271	2252	2249	2271	2252	2249	2249
2	หลังอบ				2140	2188	2149	2162	2144	2149	2162	2144	2138	2138
	หลังขัด				2135	2186	2145	2145	2145	2145	2145	2145	2145	2145
3	หลังอบ				2124	2174	2135	2153	2131	2135	2153	2131	2124	2124
	หลังขัด				2122	2172	2131	2131	2131	2131	2131	2131	2131	2131
4	หลังอบ				2110	2163	2125	2142	2115	2125	2142	2122	2115	2115
	หลังขัด				2107	2162	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122
5	หลังอบ				2104	2160	2117	2141	2113	2160	2117	2141	2113	2113
	หลังขัด				2100	2160	2116	2140	2116	2160	2116	2140	2116	2112
6	หลังอบ				2098	2159	2114	2139	2111	2159	2114	2139	2111	2111
	หลังขัด				2096	2158	2113	2139	2111	2158	2113	2139	2111	2111
7	หลังอบ				2093	2156	2110	2137	2104	2156	2110	2137	2104	2104
	หลังขัด				2090	2154	2108	2137	2104	2154	2108	2137	2104	2104
8	หลังอบ				2088	2152	2104	2136	2103	2152	2104	2136	2103	2103
	หลังขัด				2088	2152	2102	2136	2103	2152	2102	2136	2103	2103
9	หลังอบ				2085	2150	2100	2136	2102	2150	2100	2136	2102	2102
	หลังขัด				2085	2149	2100	2136	2102	2149	2100	2136	2102	2102
10	หลังอบ				2082	2147	2096	2136	2101	2147	2096	2136	2101	2101
	หลังขัด				2082	2147	2096	2136	2101	2147	2096	2136	2101	2101
11	หลังอบ				2079	2144	2092	2135	2100	2144	2092	2135	2100	2100
	หลังขัด				2078	2143	2089	2135	2100	2143	2089	2135	2100	2100
12	หลังอบ				2076	2140	2085	2128	2097	2140	2085	2128	2097	2097
	หลังขัด				2074	2139	2084	2128	2097	2139	2084	2128	2097	2097
					2069	2135	2078			2135	2078			

ผลการทดสอบความคงทนของวัสดุโดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying Test) ของวัสดุ PMCSA

Cycle...12. Type sample ...UCS.....															
Project Laboratory assessment for long-term performance				Location		Soil Description PMCSA									
										Sample Volume	953.4208 (cm ³)				
Owner Nattanon K.				Date strat											
Cycle /Sample	soak (หลังอบ)			W/D(หลังอบ)			W/D(หลังซัด)			soak (หลังแช่น้ำ)			W/D (หลังแช่น้ำ)		
	4	5	2	3	8	6	3	8	6	4	5	1	3	8	6
Cycle 0	2121	2135	2133	2116	2117	2139	2116	2117	2139	2172	2182	2187	2178	2127	2195
Cycle 1	2023	2033	2029	2021	2019	2042	2008	2006	2028	2154	2162	2162	2139	2132	2161
Cycle 2	2012	2020	2013	1995	1994	2021	1977	1978	2013	2147	2155	2151	2109	2105	2146
Cycle 3	2005	2014	2005	1971	1973	2009	1964	1968	2003	2143	2151	2147	2096	2097	2139
Cycle 4	1999	2011	1999	1959	1965	2001	1954	1960	1997	2137	2146	2140	2085	2084	2129
Cycle 5	1997	2008	1994	1951	1957	1994	1948	1952	1990	2137	2146	2135	2083	2085	2127
Cycle 6	1993	2004	1986	1943	1948	1987	1940	1943	1985	2133	2144	2130	2071	2070	2119
Cycle 7	1991	2000	1984	1946	1944	1983	1935	1940	1979	2122	2134	2118	2062	2059	2106
Cycle 8	1981	1996	1974	1931	1930	1974	1925	1928	1970	2121	2131	2114	2054	2053	2100
Cycle 9	1981	1995	1973	1925	1928	1970	1923	1924	1963	2119	2128	2109	2050	2049	2092
Cycle 10	1979	1991	1965	1920	1920	1961	1918	1919	1960	2111	2125	2106	2047	2043	2089
Cycle 11	1970	1984	1961	1917	1917	1956	1911	1913	1954	2107	2118	2101	2040	2038	2084
Cycle 12	1966	1979	1954	1910	1912	1953	1907	1906	1951	2099	2108	2088	2032	2027	2078

Cycle...12. Type sample ...UCS.....		Location		Soil Description PMCSA		Sample Volume 953.4208 (cm ³)		Date strat								
Project Laboratory assessment for long-term performance																
Owner Nattanon K.																
Cycle /Sample	%Weight loss (soak)		%Weight loss (W/D)		%Weight loss (soak) ๙๙๙๙		%Weight loss (W/D) ๙๙๙๙		Absorption (soak)		Absorption (W/D)					
	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5
0						0	0	0	0	0	2.40	2.20	2.53	2.93	0.47	2.62
1	4.62	4.78	5.10	5.19	4.88	4.62	4.78	4.88	5.10	5.24	6.48	6.35	6.55	6.52	6.28	6.56
2	0.54	0.64	0.79	0.74	0.56	5.16	5.42	5.66	6.65	6.64	6.71	6.68	6.86	6.68	6.42	6.61
3	0.35	0.30	0.40	0.50	0.66	5.51	5.71	6.06	7.31	7.14	6.88	6.80	7.08	6.72	6.55	6.79
4	0.30	0.15	0.30	0.30	0.51	5.81	5.86	6.36	7.81	7.55	6.90	6.71	7.05	6.70	6.33	6.61
5	0.10	0.15	0.25	0.35	0.31	5.91	6.01	6.61	8.12	7.96	7.01	6.87	7.07	6.93	6.81	6.88
6	0.20	0.20	0.40	0.25	0.41	6.11	6.21	7.01	8.53	8.42	7.02	6.99	7.25	6.75	6.54	6.75
7	0.10	0.20	0.10	0.30	0.26	6.21	6.41	7.11	8.79	8.57	6.58	6.70	6.75	6.56	6.13	6.42
8	0.50	0.20	0.50	0.45	0.52	6.71	6.61	7.62	9.31	9.19	7.07	6.76	7.09	6.70	6.48	6.60
9	0.00	0.05	0.05	0.36	0.10	6.71	6.66	7.67	9.41	9.40	6.97	6.67	6.89	6.60	6.50	6.57
10	0.10	0.20	0.41	0.15	0.26	6.82	6.86	8.07	9.67	9.66	6.67	6.73	7.18	6.73	6.46	6.58
11	0.45	0.35	0.20	0.31	0.36	7.27	7.21	8.28	10.04	9.97	6.95	6.75	7.14	6.75	6.53	6.65
12	0.20	0.25	0.36	0.15	0.21	7.47	7.47	8.63	10.24	10.34	6.77	6.52	6.86	6.55	6.35	6.51

ผลการทดสอบความคงทนของวัสดุโดยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying Test) ของวัสดุ PMCSBR

Cycle...12. Type sample ...UCS.....															
Project Laboratory assessment for long-term performance															
Cycle /Sample	soak (หลังอบ)						W/D(หลังซัด)			soak (หลังแช่น้ำ)			W/D (หลังแช่น้ำ)		
	2	3	6	1	4	5	1	4	5	2	3	6	1	4	5
Owner Nattanon K.	soak (หลังอบ)						W/D(หลังซัด)			soak (หลังแช่น้ำ)			W/D (หลังแช่น้ำ)		
	2142	2171	2168	2100	2196	2204	2100	2196	2204	2194	2203	2209	2154	2224	2236
	2038	2070	2062	2001	2096	2102	1988	2089	2095	2180	2188	2197	2125	2202	2214
	2027	2059	2051	1976	2083	2088	1961	2080	2083	2175	2184	2195	2103	2198	2206
	2022	2053	2048	1954	2079	2082	1948	2077	2080	2174	2182	2196	2091	2196	2205
	2020	2052	2048	1944	2076	2078	1940	2074	2077	2171	2178	2192	2081	2191	2199
	2019	2052	2047	1938	2074	2075	1927	2072	2073	2169	2179	2193	2068	2192	2199
	2018	2051	2047	1923	2071	2072	1919	2070	2071	2168	2175	2190	2060	2186	2193
	2015	2047	2043	1916	2068	2068	1910	2067	2067	2165	2175	2189	2051	2185	2191
	2009	2042	2040	1907	2066	2066	1903	2065	2064	2163	2172	2189	2044	2185	2189
	2007	2041	2039	1901	2065	2063	1898	2065	2062	2159	2162	2183	2037	2077	2182
	2005	2037	2038	1895	2062	2061	1892	2062	2060	2160	2168	2188	2034	2183	2186
	2004	2037	2037	1891	2063	2060	1888	2055	2058	2160	2167	2187	2029	2174	2183
	2002	2036	2035	1886	2055	2056	1882	2054	2056	2151	2157	2173	2020	2162	2172

Cycle...12. Type sample ...UCS.....																		
Project Laboratory assessment for long-term performance																		
Soil Description PM/CSBR																		
Location																		
Date strat																		
Sample Volume 953.421 (cm ³)																		
Owner Nattanon K.																		
Cycle /Sample	%Weight loss (soak)			%Weight loss (W/D)			%Weight loss (soak) 85%N			%Weight loss (W/D) 85%N			Absorption (soak)			Absorption (W/D)		
	2	3	6	1	4	5	2	3	6	1	4	5	2	3	6	1	4	5
0							0	0	0	0	0	2.43	1.47	1.89	2.57	1.28	1.45	
1	4.86	4.65	4.89	5.33	4.87	4.95	4.86	4.65	4.89	5.33	4.87	4.95	6.97	5.70	6.55	6.89	5.41	5.68
2	0.54	0.53	0.53	1.36	0.43	0.57	5.40	5.18	5.42	6.69	5.30	5.52	7.30	6.07	7.02	7.24	5.67	5.90
3	0.25	0.29	0.15	0.66	0.14	0.14	5.64	5.48	5.57	7.35	5.45	5.66	7.52	6.28	7.23	7.34	5.73	6.01
4	0.10	0.05	0.00	0.41	0.14	0.14	5.74	5.52	5.57	7.77	5.59	5.81	7.48	6.14	7.03	7.27	5.64	5.87
5	0.05	0.00	0.05	0.67	0.10	0.19	5.79	5.52	5.62	8.44	5.69	6.00	7.43	6.19	7.13	7.32	5.79	6.08
6	0.05	0.05	0.00	0.42	0.10	0.10	5.84	5.57	5.62	8.85	5.78	6.10	7.43	6.05	6.99	7.35	5.60	5.89
7	0.15	0.20	0.20	0.47	0.14	0.19	5.99	5.77	5.81	9.32	5.93	6.29	7.44	6.25	7.15	7.38	5.71	6.00
8	0.30	0.24	0.15	0.37	0.10	0.15	6.29	6.01	5.96	9.69	6.03	6.43	7.67	6.37	7.30	7.41	5.81	6.06
9	0.10	0.05	0.05	0.26	0.00	0.10	6.39	6.06	6.01	9.95	6.03	6.53	7.57	5.93	7.06	7.32	0.58	5.82
10	0.10	0.20	0.05	0.32	0.15	0.10	6.49	6.26	6.06	10.26	6.17	6.63	7.73	6.43	7.36	7.51	5.87	6.12
11	0.05	0.00	0.05	0.21	0.34	0.10	6.54	6.26	6.11	10.48	6.51	6.72	7.78	6.38	7.36	7.47	5.79	6.07
12	0.10	0.05	0.10	0.32	0.05	0.10	6.63	6.31	6.21	10.79	6.56	6.82	7.44	5.94	6.78	7.33	5.26	5.64

ผลการทดสอบความคงทนการสึกกร่อนของวัสดุ โดยวิธี Erodibility test วัสดุชนิด PMC

Erodibility Test							
Project Laboratory assessment for long-term performance and durability of cement-polymer stabilized road base				Owner หน่วยงานที่คุมครุฑ Soil Description PMC			
Location			Sample Depth			Date 16/08/2564	
Mold DIA. (cm)	15.3	HT. (cm)	11.415	VOL.(cm ³)	2098.691767	WT.(gm)	6930
Density Determination:							
Tare No.		1	2	3	AVG	5	6
WT.Of Mold+Wet Soil	(g)	12035	12043	12017	12032		
WT.Of Wet Soil	(g)	5105	5113	5087	5102		
Wet Density	(g/cm ³)	2.43	2.44	2.42	2.43		
Dry Density	(g/cm ³)	2.30	2.30	2.30	2.30		
Water Content:							
WT.Of Tare	(g)	17.57	16.79	18.11	17.49		
WT.Of Tare+Wet Soil	(g)	103.77	81.7	170.66	118.71		
WT.Of Tare+Dry Soil	(g)	98.97	78.18	162.97	113.37		
WT.Of Water	(g)	4.8	3.52	7.69	5.34		
WT.Of Dry Soil	(g)	81.4	61.39	144.86	95.88		
Water Content:	(%)	5.90	5.73	5.31	5.57		
Erodibility Test							
Tare No.		1	2	3	AVG	5	6
Metel Container	(g)	224.6	223.9	403.17	283.89		
Metel Container + Fines	(g)	429.3	399.8	623.6	484.23		
M _F	(g)	204.70	175.90	220.43	200.34		
Erodibility	(g/min)	13.65	11.73	14.70	13.36		

ผลการทดสอบความคงทนการสึกกร่อนของวัสดุ โดยวิธี Erodibility test วัสดุชนิด PMCSA

Erodibility Test							
Project Laboratory assessment for long-term performance and durability of cement-polymer stabilized road base				Owner หน่วยงานที่ คุ้มครุท			
Location				Sample Depth		Date 16/08/2564	
Mold DIA. (cm)	15.3	HT. (cm)	11.415	VOL.(cm ³)	2098.692	WT.(gm)	3960
Density Determination:							
Tare No.		1	2	3	AVG	5	6
WT.Of Mold+Wet Soil	(g)	8909	8919	8901	8910		
WT.Of Wet Soil	(g)	4949	4959	4941	4950		
Wet Density	(g/cm ³)	2.36	2.36	2.35	2.36		
Dry Density	(g/cm ³)	2.26	2.27	2.26	2.26		
Water Content:							
WT.Of Tare	(g)	20.73	20.7	15.22	18.88		
WT.Of Tare+Wet Soil	(g)	138.42	127.66	123.4	129.83		
WT.Of Tare+Dry Soil	(g)	133.67	123.29	119.04	125.33		
WT.Of Water	(g)	4.75	4.37	4.36	4.49		
WT.Of Dry Soil	(g)	112.94	102.59	103.82	106.45		
Water Content:	(%)	4.21	4.26	4.20	4.22		
Erodibility Test							
Tare No.		1	2	3	AVG	5	6
Metel Container	(g)	403.3	401.82	400.469	401.86		
Metel Container + Fines	(g)	541.8	490.05	512.63	514.83		
M _F	(g)	138.50	88.23	112.16	112.96		
Erodibility	(g/min)	9.23	5.88	7.48	7.53		

ผลการทดสอบความคงทนการสึกกร่อนของวัสดุ โดยวิธี Erodibility test วัสดุชนิด PMCSBR

Erodibility Test							
Project Laboratory assessment for long-term performance and durability of cement-polymer stabilized road base				Owner หน่วยงานที่ คุ้มครุท			
Location				Sample Depth		Date 16/08/2564	
Mold DIA. (cm)	15.3	HT. (cm)	11.415	VOL.(cm ³)	2098.692	WT.(gm)	3960
Density Determination:							
Tare No.		1	2	3	AVG	5	6
WT.Of Mold+Wet Soil	(g)	8919	8888	8890	8899		
WT.Of Wet Soil	(g)	4959	4928	4930	4939		
Wet Density	(g/cm ³)	2.36	2.35	2.35	2.35		
Dry Density	(g/cm ³)	2.26	2.24	2.25	2.25		
Water Content:							
WT.Of Tare	(g)	17.58	16.18	24.99	19.58		
WT.Of Tare+Wet Soil	(g)	179.8	114.21	113.01	135.67		
WT.Of Tare+Dry Soil	(g)	173.03	109.71	109.15	130.63		
WT.Of Water	(g)	6.77	4.5	3.86	5.04		
WT.Of Dry Soil	(g)	155.45	93.53	84.16	111.05		
Water Content:	(%)	4.36	4.81	4.59	4.54		
Erodibility Test							
Tare No.		1	2	3	AVG	5	6
Metel Container	(g)	128	226.9	404.4	253.10		
Metel Container + Fines	(g)	164.53	263.03	487.95	305.17		
M _F	(g)	36.53	36.13	83.55	52.07		
Erodibility	(g/min)	2.44	2.41	5.57	3.47		

