

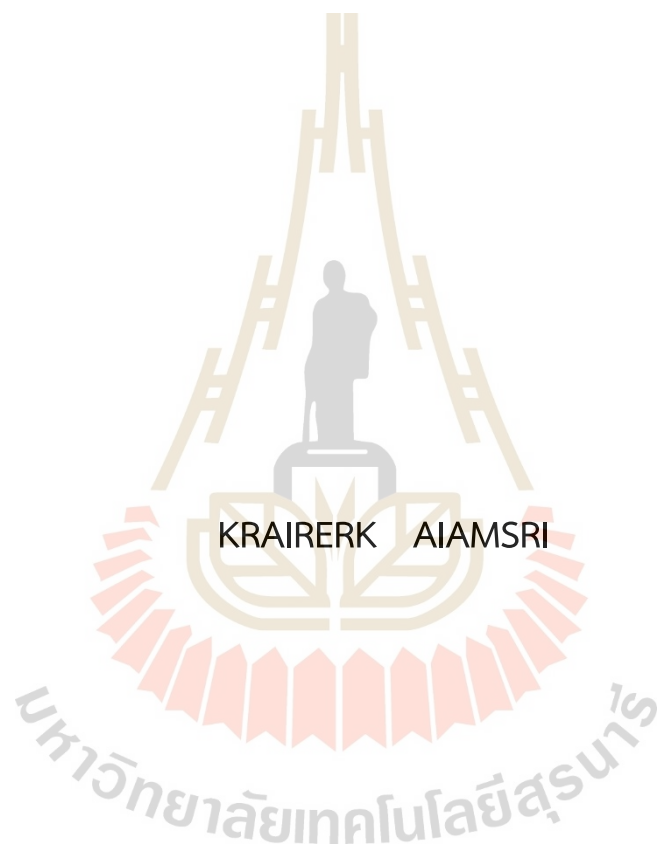
สมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วย
น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่อุณหภูมิแตกต่างกัน



นายไกรฤกษ์ เอี่ยมศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ขนส่ง และทรัพยากรธรณี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2564

MECHANICAL PROPERTIES OF SOIL-CEMENT MODIFIED WITH
NATURAL RUBBER LATEX AT DIFFERENT TEMPERATURES



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil, Transportation and
Geo-resources Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2021

สมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วย
น้ำยาฟอสเฟตเสริมที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

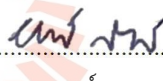

(Dr.Menglim Hoy)

ประธานกรรมการ

.....


(ศ. ดร.สุชนันต์ หอทิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

.....


(รศ. ดร.เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์)

กรรมการ

.....


(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

.....


(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี


ไกรฤกษ์ เอี่ยมศรี : สมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (MECHANICAL PROPERTIES OF SOIL-CEMENT MODIFIED WITH NATURAL RUBBER LATEX AT DIFFERENT TEMPERATURES)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 70 หน้า

คำสำคัญ : ดินซีเมนต์/ยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม/อุณหภูมิ

การวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มมาเป็นวัสดุในปรับปรุงสมบัติของดินซีเมนต์ เพื่อใช้ในงานชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง ซึ่งข้อดีของดินซีเมนต์คือ เป็นวิธีการที่ง่ายและแพร่หลายในการปรับปรุงคุณภาพของดิน อย่างไรก็ตามดินที่ผสมซีเมนต์จะเกิดพฤติกรรมการแตกร้าวภายใต้แรงกระทำ เนื่องจากดินซีเมนต์มีลักษณะแข็งแต่เปราะ ดังนั้นการผสมน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม จะช่วยให้ดินซีเมนต์มีความเหนียวเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถเพิ่มอายุใช้งานของวัสดุดินซีเมนต์ได้ยาวนานยิ่งกว่าดินซีเมนต์ธรรมดา

ในการวิจัยนี้จะศึกษา กำลังรับแรงอัดแกนเดียว กำลังรับแรงดึงทางอ้อม โมดูลัสการคืนตัว เนื่องจากแรงดึงทางอ้อม ความต้านทานการแตกร้าวจากความล้าโดยแรงดึงทางอ้อม ของดินผสมซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่ร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 ด้วยวิธีการแทนที่น้ำที่ปริมาณเหมาะสมด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม โดยที่การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม โมดูลัสการคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม ความต้านทานการแตกร้าวจากความล้าโดยแรงดึงทางอ้อม จะทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส เพื่อจำลองการทดสอบที่ได้ให้ตรงกับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนถนนจริง

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 



KRAIRERK AIAMSRI : MECHANICAL PROPERTIES OF SOIL-CEMENT MODIFIED WITH
NATURAL RUBBER LATEX AT DIFFERENT TEMPERATURES. THESIS ADVISOR :
PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D. 70 PP.

Keyword : Soil-Cement/Natural rubber latex/Temperature

This research aims to study the possibility of using water mixed natural rubber latex compounds added to improve the material properties of the soil -cement for using in the work of the base pavement and subbase pavement. The advantages of soil-cement are It is a simple and widespread method to improve soil quality. However, the soil-cement exhibited cracking behavior under load. Because cement soil is hard but brittle. Therefore, the mixture of rubber latex is added to the mixture. The soil-cement to increase its toughness Which can increase the life of the soil-cement materials for longer lasting than conventional soil cement.

In this research will study unconfined compressive strength, indirect tensile strength, indirect tensile resilient modulus and indirect tensile fatigue life of 3%, 5%, 7% and 9% by weight of dry soil and the natural rubber latex replacement ratios were varied at 10%, 15%, 20%, 25% and 30% by weight of optimal water. To compare the engineering properties of soil-cement modified with natural rubber latex with added admixtures. the test unconfined compressive strength, indirect tensile strength, indirect tensile resilient modulus and indirect tensile fatigue life It will be tested at 25, 40 and 60 degrees Celsius to simulate the test to match the actual road temperature.

School of Civil Engineering
Academic Year 2021

Student's Signature 
Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้ช่วยชี้แนะให้คำปรึกษา รวมทั้งให้การช่วยเหลือในการให้ความรู้ การแนะนำสิ่งที่จะต้องจนงานวิจัยนี้สามารถริเริ่ม และลุล่วงไปได้ด้วยดีเสมอมา ก่อนอื่นผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ให้กำเนิดและอบรมสั่งสอนให้ความรู้ด้วยดีเสมอมา

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุชนันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้โอกาสทางการศึกษา ถ่ายทอดวิชาความรู้ เป็นแบบอย่างในการดำเนินชีวิต และให้คำแนะนำปรึกษาเรื่องวิจัย ช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้านวิชาการและประสบการณ์

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.Menglim Hoy ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์ กรรมการ ที่กรุณาให้ความรู้และแนวคิด ตลอดจนข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์ ดร.ธีรศักดิ์ เขียวราช และ ดร.อภิรักษ์ บุริตรธรรม ที่กรุณาให้คำปรึกษาชี้แนะและช่วยเหลือจนกระทั่งการทำวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จสมบูรณ์

และผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ พี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณคงศักดิ์ อัครวงศ์วัฒนา คุณมัลลิกา มอภะระโทก ที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการและให้กำลังใจมาโดยตลอด

ไกรฤกษ์ เอี่ยมศรี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ประวัติความเป็นมาของการปรับปรุงคุณภาพดิน	4
2.2 โครงสร้างของดินซีเมนต์.....	7
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของดินซีเมนต์.....	9
2.4 ปูนซีเมนต์	12
2.5 นํ้ายารพารา	15
3. วิธีดำเนินการวิจัย	19
3.1 วัสดุในการวิจัย	20
3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินลูกรัง	21
3.3 เงื่อนไขการทดสอบ	24
4. ผลการศึกษาและการวิเคราะห์	26
4.1 บทนำ.....	26
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินที่ใช้ในงานวิจัย.....	26

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วย น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม	29
4.4	ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วย น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส.....	30
4.5	ผลการทดสอบโมดูลัสการคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์ ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส.....	37
4.6	ผลการทดสอบความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าจากแรงดึงทางอ้อม ของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม โดยทดสอบที่ อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส.....	39
4.7	การออกแบบและการประมาณค่าก่อสร้างถนนชั้นรองพื้นทางของถนน ดินซีเมนต์กับถนนดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม	44
5.	บทสรุป	49
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	49
5.1.1	สมบัติด้านกำลังของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา ผสมสารผสมเพิ่ม.....	49
5.1.2	การเปรียบเทียบค่าก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางของถนนดินซีเมนต์ ถนนดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม	50
บรรณานุกรม	51
ภาคผนวก	54
ประวัติผู้เขียน	68

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	วิธีปรับปรุงคุณภาพของดินที่ต่างชนิดกัน	5
2.2	วิธีปรับปรุงคุณภาพของดินที่แปรผันตามขนาดเม็ดดิน	7
2.3	แนวทางเลือกใช้สารผสมเพิ่มกับวัสดุแต่ละชนิด	7
3.1	แสดงคุณสมบัติน้ำยางธรรมชาติ	21
3.2	จำนวนตัวอย่างทดสอบการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	25
4.1	แสดงสมบัติเบื้องต้นของดินเทียบกับมาตรฐานชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ (ทล.ท) 204-2532).....	28

สารบัญญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell and Jack, 1966).....	8
2.2	แบบจำลองอนุภาคยางธรรมชาติ (Nawamawat, 2011)	16
2.3	ยางพารามีโครงสร้างทางเคมีแบบ ซิส-1, 4-พอลิไอโซพรีน	16
	(สวุดี ก้องพารากุล, 2556)	
3.1	แผนดำเนินงานวิจัย.....	19
3.2	ลักษณะของดินร้ง	20
3.3	น้ำยางธรรมชาติ.....	21
3.4	การทดสอบหากล้างรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength, ITS)	23
4.1	การกระจายตัวของเม็ดดิน	26
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและจำนวนการตกกระทบ	27
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้น	29
4.4	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์กับความเครียด ที่อัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกันและปริมาณ ซีเมนต์ที่ ร้อยละ 3(a), 5(b), 7(c) และ 9(d).....	30
4.5	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์กับอัตราส่วนการแทนที่น้ำ ยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน ที่ปริมาณซีเมนต์ที่ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9	31
4.6	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์กับค่าการยุบตัว ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกันที่ อุณหภูมิ 25(a), 40(b) และ 60(c) องศาเซลเซียส	33
4.7	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์กับค่าการยุบตัว ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกันที่ อุณหภูมิ 25(a), 40(b) และ 60(c) องศาเซลเซียส	34
4.8	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์กับค่าการยุบตัว ร้อยละ 7 ที่อัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกันที่ อุณหภูมิ 25(a), 40(b) และ 60(c) องศาเซลเซียส	38

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์กับค่าการยุบตัว ร้อยละ 9 ที่อัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มเติมที่แตกต่างกันที่ อุณหภูมิ 25(a), 40(b) และ 60(c) องศาเซลเซียส36
4.10	แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสการคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์กับ ที่อัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มเติมที่แตกต่างกันและปริมาณ ซีเมนต์ที่ ร้อยละ 3(a), 5(b), 7(c) และ 9(d)38
4.11	แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าจากแรงดึง ทางอ้อมของดินซีเมนต์ร้อยละ 3 กับจำนวนรอบที่อัตราส่วนการแทนที่ น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มเติมที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 25(a), 40(b) และ 60(c) องศาเซลเซียส 40
4.12	แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าจากแรงดึง ทางอ้อมของดินซีเมนต์ร้อยละ 5 กับจำนวนรอบที่อัตราส่วนการแทนที่ น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มเติมที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 25(a), 40(b) และ 60(c) องศาเซลเซียส 41
4.13	แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าจากแรงดึง ทางอ้อมของดินซีเมนต์ร้อยละ 7 กับจำนวนรอบที่อัตราส่วนการแทนที่ น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มเติมที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 25(a), 40(b) และ 60(c) องศาเซลเซียส 42
4.14	แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าจากแรงดึง ทางอ้อมของดินซีเมนต์ร้อยละ 9 กับจำนวนรอบที่อัตราส่วนการแทนที่ น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มเติมที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 25(a), 40(b) และ 60(c) องศาเซลเซียส 43
4.15	แสดงความสัมพันธ์ของความหนาชั้นพื้นทางกับอัตราส่วนการแทนที่ น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มเติมที่แตกต่าง ที่ปริมาณซีเมนต์ที่ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 45
4.16	แสดงความสัมพันธ์ของค่าวัสดุก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางกับอัตราส่วนการแทนที่ น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มเติมที่แตกต่าง ที่ปริมาณซีเมนต์ที่ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17	
แสดงความสัมพันธ์ของค่าก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางทั้งหมดกับอัตราส่วน การแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่าง ที่ปริมาณซีเมนต์ที่ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9	48



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

โครงสร้างของถนนประกอบด้วยชั้นผิวทางและชั้นโครงสร้างทาง ชั้นผิวทางสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ ผิวทางคอนกรีตและผิวทางแอสฟัลต์ค้อนกรีต ในขณะที่ชั้นโครงสร้างทางประกอบไปด้วย ชั้นรองพื้นทาง (Sub-base) และชั้นพื้นทาง (Base) ซึ่งการก่อสร้างถนนตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน นิยมใช้ดินลูกรังเป็นวัสดุในการก่อสร้างชั้นโครงสร้างทาง การก่อสร้างและบำรุงรักษาถนนที่ดำเนินการมาทุกปีตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันส่งผลให้ดินลูกรังคุณภาพดีที่มีอยู่ในแต่ละพื้นที่ลดน้อยลงเหลือเพียงดินลูกรังที่มีสมบัติทางวิศวกรรมต่ำในพื้นที่ จนกระทั่งในปัจจุบันหลายพื้นที่ประสบปัญหาขาดแคลนดินลูกรังที่มีคุณภาพ ทำให้ต้องใช้ดินลูกรังจากบ่อดินที่อยู่ห่างไกลจากโครงการก่อสร้าง ทำให้ต้นทุนการขนส่งเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับราคาวัสดุ ด้วยเหตุนี้ จึงมีการริเริ่มแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นที่ยอมรับโดยกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่การปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์นั้นมีข้อเสียบางประการ เช่น ดินซีเมนต์มีพฤติกรรมเป็นวัสดุเปราะ โดยมีความยืดหยุ่นต่ำและแตกร้าวได้ง่ายภายใต้การรับแรงอัด จากปัญหาดังกล่าว จึงมีการปรับปรุงดินซีเมนต์ด้วยการเติมสารผสมเพิ่ม โดยใช้น้ำยาพอลิเมอร์ ทำให้ดินซีเมนต์มีพฤติกรรมด้านความเหนียวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การแตกร้าวที่เกิดจากการดัดหรือทรุดตัวที่แตกต่างกันของชั้นดินลดน้อยลง โดยน้ำยาพอลิเมอร์จะสร้างชั้นฟิล์มเข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างเม็ดดินและยึดเกาะแต่ละเม็ดดินเข้าด้วยกันคล้ายการใช้เส้นใยเสริมแรงในวัสดุ ทำให้ดินซีเมนต์มีพฤติกรรมความเหนียวเพิ่มขึ้นและขณะเดียวกันยังส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้นจากเดิม แต่เนื่องจากน้ำยาพอลิเมอร์มีราคาสูง ประกอบกับรัฐบาลต้องการส่งเสริมการใช้น้ำยาพารา เนื่องจากราคาผลผลิตตกต่ำ จึงมีการนำน้ำยาพารามาใช้แทนน้ำยาพอลิเมอร์

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้น ในเดือนเมษายนของทุกปี เวลากลางวันอุณหภูมิจะสูงถึง 43 องศาเซลเซียส และในท้องถนนมีอุณหภูมิถึง 60 องศาเซลเซียส จากงานวิจัยในอดีต ซึ่งได้ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยาพาราที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิจริงในท้องถนน จากปัญหาดังกล่าวจึงเป็นแนวทางในการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยาพารา โดยจำลองอุณหภูมิที่เกิดในบนท้องถนน

ดังนั้น งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม ที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส โดยทำการศึกษากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) กำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS) โมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Resilient Modulus, IT M_r) และความล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue Life, ITFL) เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมกับดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์ในการทดสอบสมบัติดินซีเมนต์ ดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบค่าก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางของถนนดินซีเมนต์กับถนนดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

แนวทางการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

- 1.3.1 ดินลูกรัง อำเภอขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา
- 1.3.2 น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม
- 1.3.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1
- 1.3.4 อายุบ่มตัวอย่างก่อนการทดสอบ 7 วัน
- 1.3.5 ทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสมบัติทางกลของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยาฟอสเฟตผสมเพิ่ม โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียสทราบผลกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยาฟอสเฟตผสมเพิ่ม ที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส

1.4.2 ทราบค่าก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางของถนนดินซีเมนต์กับถนนดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยาฟอสเฟตผสมเพิ่ม



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมาของการปรับปรุงคุณภาพดิน

ดินเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีอยู่อย่างมากมาย ซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดและสภาพแวดล้อม จึงมีความจำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพดินให้มีความเหมาะสมกับงานแต่ละประเภท เทคโนโลยีและเทคนิคในการปรับปรุงดินที่ใช้กันในปัจจุบัน ประกอบไปด้วย แนวความคิดพื้นฐานหลักดังนี้ การทำให้แน่น (Densification) การเชื่อมประสาน (Cementation) การเสริมแรง (Reinforcement) การระบาย (Drainage and Consolidation)

แนวความคิดเรื่องการปรับปรุงดินให้มีความสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้นโดยการผสมวัสดุเชื่อมประสาน ได้เกิดขึ้นเป็นเวลาหลายพันปีมาแล้ว วัสดุเชื่อมประสานที่ใช้กันในยุคแรกคือ ปูนขาวหรือวัสดุพอลิไซลัน ซึ่งจะทำการค่าดัชนีสภาพพลาสติก (Plasticity Index, PI) ของดินลดลง และมีผลให้ดินรับแรงอัดได้ดีขึ้น หลังจากนั้นได้มีการศึกษาอย่างต่อเนื่องมาหลายศตวรรษ (Terrel et al., 1979)

Hogentogler (1938) ได้กล่าวว่าการปรับปรุงคุณภาพของดินเป็นกระบวนการที่ทำให้ดินตามธรรมชาติมีความทนทานต่อการสึกหรอ และการรับน้ำหนักดีขึ้น วิธีการที่ใช้อาจจะเป็นการอัดให้แน่น การนำสารผสมมาเติมลงในดิน สารผสมนี้อาจจะอยู่ในรูปของเหลวหรือเป็นผงก็ได้

Mitchell (1982) ได้กล่าวถึงวัตถุประสงค์ในการนำสารเคมีผสมลงในดินเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินได้แก่ ควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ปรับปรุงการไหลซึมของน้ำที่ผ่านดินและความทนทานต่อการกัดกร่อนและกัดเซาะของดิน

Cireo et al., (1962) อธิบายว่าการใส่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) ลงในดินจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและโครงสร้างของดิน ดินเกือบทุกชนิดสามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ แต่ผลของการปรับปรุงคุณสมบัติของดิน จะไม่เหมือนกันถึงแม้ว่าดินจะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์เหมือนกัน ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้เท่ากันแต่คุณสมบัติทางเคมีต่างกันก็จะมีผลกระทบต่อค่ารับกำลังแรงอัดของดิน (Compressive Strength) ไม่เหมือนกันด้วย แสดงว่าส่วนประกอบทางเคมีจะมีผลเป็นอย่างมากต่อการรับแรงอัดของดินซีเมนต์

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930 เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้ามีปริมาณมากขึ้น ในปี ค.ศ. 1930-1939 สหรัฐอเมริกาได้เริ่มศึกษาการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต โดยในปี ค.ศ. 1937 นักวิจัยชื่อ Davis และคณะจากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ได้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าลอย ในงานคอนกรีต ในปี ค.ศ. 1948 ได้มีการใช้เถ้าลอยในการก่อสร้างเขื่อน Hungry Horse

และต่อมาในปี ค.ศ. 1970-1979 ได้เกิดวิกฤติการณ์น้ำมัน ทำให้มีการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงส่งผลให้มีปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นและได้มีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวาง เพื่อทำความเข้าใจปฏิกิริยาเคมีของเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์ที่เกิดขึ้น ในปัจจุบันมีการนำเถ้าลอยมาใช้กับงานคอนกรีตอย่างแพร่หลาย เพื่อเป็นการลดต้นทุนของคอนกรีตและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดเถ้าลอยทิ้ง นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาการนำเถ้าลอยลิกไนต์จากอำเภอแม่เมาะมาผสมในดินสำหรับงานถนน เช่น อนิรุทธ์ ธงไชย และ สุเทพ นิมนวล (2530); สมชัย กกก่ำแหง (2535); Rhee and Yong-Heun (1982) นักวิจัยเหล่านี้พบว่ากำลังอัดของซีเมนต์ผสมเถ้าลอยมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น (ในช่วง 0-15%) ตามระยะเวลาการบ่มและค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่าขีดเหลว ค่าขีดพลาสติก และดัชนีพลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย

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

United States Airforce (1966) ได้เสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยแบ่งตามขนาดและค่า Plastic Index ดังตารางที่ 2.1

Metcalf (1977) ได้เสนอการเลือกวิธีปรับปรุงคุณภาพของดิน ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งวิธีการนี้จะต้องเลือกให้เหมาะสมที่สุดในแต่ละชนิดของดิน โดยคำนึงถึงอิทธิพลของขนาดเม็ดดินเป็นหลัก โดยให้ความแข็งแรงเท่ากันในระยะยาว ปูนซีเมนต์ผสมดังกล่าวได้แก่ Cement - Slag, Cement – Fly Ash และ Cement - Lime ซึ่งใช้กันอย่างกว้างขวางใน New South Wale, South Australia และ Queensland ซึ่งได้มีการเสนอแนวทางเลือกใช้สารผสมเพิ่ม ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.1 วิธีปรับปรุงคุณภาพของดินที่ต่างชนิดกัน

Soil Type	Most Effective Stabilization Method
1. Coarse Granular	Mechanical Blending Soil-Asphalt Soil-Cement Lime - Fly Ash
2. Fine Granular Soils	Mechanical Blending Portland Cement Stabilization

Soil Type	Most Effective Stabilization Method
	Soil-Asphalt Lime-Fly Ash Chloride 3
3. Clays of Low Plasticity	Compaction Portland Cement Stabilization Chemical Water proofers Lime Modification
4. Clays of High Plasticity	Lime Stabilization

ที่มา: United States Airforce (1966)

ตารางที่ 2.2 วิธีปรับปรุงคุณภาพของดินที่แปรผันตามขนาดเม็ดดิน

Applicability of Stabilization Methods	Type of Soil					
	Fine Clays	Coarse Clays	Fine Silts	Coarse Silts	Fine Sands	Coarse Sands
Designation	Fine Clays	Coarse Clays	Fine Silts	Coarse Silts	Fine Sands	Coarse Sands
Soil Particle Size (mm)	<.0006	.006-.002	.002-.01	.01-.06	.06-.4	.4-2.0
Soil Volume Stability	Very poor	Fair	Fair	Good	Very Good	Very Good
Type of Stabilization Application						
Lime	X	X	X			
Cement	X X	X X	X X	X X	X	X
Bitumen					X	X
Polymeric-Organic		X X	X	X	X	

ตารางที่ 2.2 วิธีปรับปรุงคุณภาพของดินที่แปรผันตามขนาดเม็ดดิน(ต่อ)

Applicability of Stabilization Methods	Type of Soil					
Mechanical		X	X	X	X	X
Thermal	X	X				

X = Range of Maximum Efficiency XX = Effective, but Quality Control May be Difficult
ที่มา: Metcalf (1977)

ตารางที่ 2.3 แนวทางเลือกใช้สารผสมเพิ่มกับวัสดุแต่ละชนิด

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

Usually Very Suitable "A" Usually Satisfactory "B" Usually not Suitable "N"

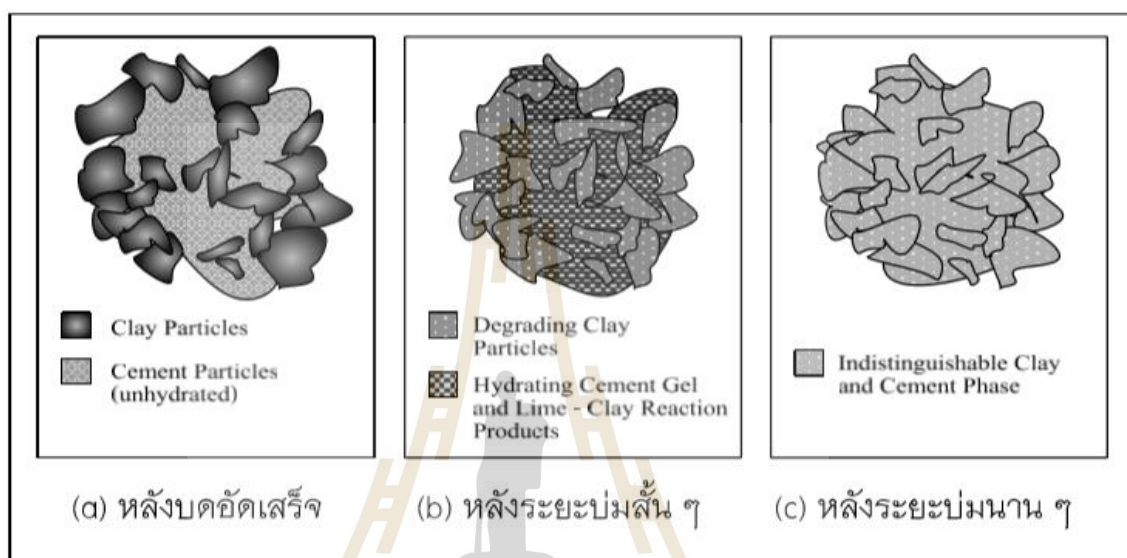
* Depend upon grading (Single size sand require higher additive content)

ที่มา: Wilmot (1995)

2.2 โครงสร้างของดินซีเมนต์

Mitchell and Jack (1966) ได้อธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างของดินซีเมนต์โดยแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบในโครงสร้างของดินซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อถูกบดอัด อนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเข้าไปผสมกับอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.1(a) ในช่วงอายุบ่ม อันสั้นอนุภาคของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันกับน้ำ เป็นผลให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และปล่อยปูนขาวออกมา ปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่มี

อยู่ในดินและเกิดการแยกตัว หลังจากนั้นซีเมนต์เจลและสารที่ได้จากปฏิกิริยาจะแพร่กระจายไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.1(c) สำหรับช่วงอายุบ่มยาวนานปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันจะเกิดอย่างสมบูรณ์ ทำให้ซีเมนต์เจลแทรกซึมกระจายไปทั่วทั้งก้อนของดินซีเมนต์ เป็นผลให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell and Jack, 1966)

แม้ว่าสารเติมแต่งทางเคมีจะมีความแตกต่างกันโดยปกติแล้วสารผสมเพิ่มที่ทำให้ดินมีเสถียรภาพเหล่านี้จะแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักคือ สารเติมแต่งแบบดั้งเดิมและไม่ใช้แบบดั้งเดิม (Marto, 2014; Estabragh, 2011; Jamsawang, 2015; Onyejekwe, 2014; Tingle, 2007)

สารเติมแต่งแบบดั้งเดิมนั้นเกี่ยวข้องกับสารเคมีในหมู่ปูนขาว ถ้ำลอย ปิทุมินัสและซีเมนต์ ซึ่งได้รับการศึกษาและค้นพบอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับประสิทธิภาพของสารเหล่านี้ในสิ่งพิมพ์หลายชนิด การใช้ประโยชน์ของซีเมนต์ในการเพิ่มคุณสมบัติมีผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักและการพัฒนาความแข็งแรง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากซีเมนต์เพื่อให้ได้ความแข็งแรงตามที่ต้องการอย่างคาดหวังไว้ (Tingle, 2003; Azzam, 2014; Horpiubulsuk, 2010; Horpiubulsuk, 2005; Horpiubulsuk, 2012)

ถึงแม้ว่าการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์สามารถเพิ่มความแข็งแรงและคุณสมบัติทางวิศวกรรมได้ แต่ผลลัพธ์ของความแข็งแรงเนื่องจากผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันของซีเมนต์อาจมีพฤติกรรมแตกหักที่เปราะ ภายใต้อันตรัดและแรงกดซึ่งสามารถนำไปสู่การแตกร้าวในชั้นโครงสร้างทางและส่งผลต่อ

เสถียรภาพของชั้นผิวทางที่ตั้งอยู่ด้านบนของโครงสร้างทาง การแก้ปัญหาเกี่ยวกับข้อบกพร่องนี้สามารถใช้สารเติมแต่งที่ไม่ใช่แบบดั้งเดิมซึ่งประกอบไปด้วย เรซิน กรดเอนไซม์และโพลีเมอร์ ซึ่งถูกนำเสนอเป็นสารปรับปรุงเพื่อเพิ่มความสามารถในการใช้งานและความทนทานได้ดีกว่าดินซีเมนต์ นอกจากนี้สารเติมแต่งเหล่านี้ยังสามารถช่วยเสริมความทนทานให้ได้สูงชันมากกว่าสารเติมแต่งแบบดั้งเดิม (Estabrag, 2011; Jamsawang, 2015; Tingle, 2007; Rezaeimalek, 2017)

จำนวนการใช้สารเติมแต่งอย่างเช่น น้ำยาพอลิเมอร์มีการใช้เพิ่มขึ้นอย่างมากในการประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มเสถียรภาพ เนื่องจากข้อได้เปรียบที่สำคัญคือการปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคของดินซึ่งเกิดจากการแทรกซึมของคอมโพสิตนาโน อนุภาคนาโนของน้ำยาพอลิเมอร์สามารถผลิตนาโนฟิลเลอร์โดยกระบวนการสร้างฟิล์มและการทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์เซชันเหล่านี้ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับพื้นผิวเมทริกซ์ของดิน ซึ่งส่งผลให้กำลังอัดและความสามารถรับแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น มากกว่าการใช้เพียงปูนซีเมนต์มาปรับปรุงเพียงอย่างเดียว (Mojtaba Shojaei Baghini, 2016; Baghini, 2016; Azzam, 2014; Azzam, 2011; Mirzababaei, 2017; latifi, 2014; Rezaeimalek, 2017)

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของดินซีเมนต์

รายงานการวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงถึงปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมบัติด้านกำลังอัดของดินซีเมนต์ ได้แก่ ปริมาณซีเมนต์ ชนิดของดิน สารผสมเพิ่ม ปริมาณความชื้นและการบดอัด การบ่มดินซีเมนต์ และระยะเวลาในการผสม โดยสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์จะแปรผันตรงกับสัดส่วนของดินซีเมนต์ที่เป็นส่วนผสม ระยะเวลาในการบ่ม และอุณหภูมิในการบ่ม ดังรายละเอียดดังนี้

2.3.1 ปริมาณของปูนซีเมนต์

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

2.3.2 ชนิดของดิน

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เป็นส่วนผสมในการปรับปรุงคุณภาพของดิน แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถระบุได้ว่า ประเภทของดินก็มีผลต่อสมบัติของดินซีเมนต์เช่นกัน และมีส่วนอย่างมากในการกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพ ทั้งนี้อัตราการเพิ่มกำลังอัดของดินซีเมนต์ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน (Ruenkairergsa, 1982) พันธะเชื่อมประสานในดินเม็ดหยาบแข็งแรงกว่าในดินเม็ดละเอียด ดินที่มีดินเหนียวมากจะให้กำลังอัดต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Reinhold ในปี 1955 ได้ทำการทดลองนำทรายมาผสมกับดินเหนียว โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณดินเหนียวที่ใช้ผสมตั้งแต่ร้อยละ 0-100 แล้วทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่น ที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดกับปริมาณดินเหนียว พบว่าปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้น กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นจะมีค่าลดลง นอกจากนี้ จากรายงานผลการทดสอบดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ (Winterkorn and Chandrasekhar, 1951) พบว่าสมบัติของดินซีเมนต์ขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ที่ผสมอยู่ในดิน และ Degree of Latterization ของดินลูกรัง

2.3.3 สารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่ม (Admixtures) หมายถึง สารเคมีอื่น ๆ นอกเหนือไปจาก ปูนซีเมนต์ วัสดุมวลรวม และน้ำที่ใช้เติมลงในส่วนผสมของคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติบางประการของคอนกรีต สารผสมเพิ่มจะให้ผลแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ที่ใช้ ขนาดรูปร่างและส่วนขนาดคละของวัสดุมวลรวม น้ำ อุณหภูมิ และประเภทของสารผสมเพิ่ม การใช้สารผสมเพิ่มเป็นส่วนผสมของดินซีเมนต์ย่อมมีผลต่อสมบัติของดินซีเมนต์ด้วยเช่นกัน ดังผลการศึกษาของ Clare and Pollard ในปี 1951 ที่ได้ทำการทดสอบดินทรายที่มีสารอินทรีย์ผสม อยู่ร้อยละ 0.3 พบว่าสารผสมเพิ่มจำพวกปูนขาว (Lime) มีส่วนช่วยให้ดินซีเมนต์แข็งตัวเร็วในระยะแรก ดินชนิดนี้เมื่อผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียวจะก่อตัวเมื่ออายุ 7 วัน แต่เมื่อเพิ่มปูนขาวประมาณร้อยละ 2 จะช่วยให้ดินซีเมนต์ดังกล่าวแข็งตัวเร็วขึ้น 2 วัน มีรายงานผลการทดลอง (Fuller and Dabney, 1952) ที่ระบุว่า การใส่ปูนขาวกับดินซีเมนต์ที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูงจะทำให้การผสมและการบดอัดง่ายขึ้น งานทดลองใช้สารผสมเพิ่มในการปรับปรุงสมบัติของดินซีเมนต์ (Lambe and Moh, 1957) จากผลการทดลองใช้สารผสมจำนวน 29 ชนิด ซึ่งเป็นสารในกลุ่ม Dispersants, Synthetic Resins, Waterproofing Agents, Alkalis และเกลือ เป็นส่วนผสมในดินซีเมนต์ โดยใช้ดินตะกอน ดินเหนียวปนดินตะกอน และดินฝุ่นแข็งพรุน ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้เป็นส่วนผสม ร้อยละ 5 โดยใช้สารผสมเพิ่มร้อยละ 0.5-1.0 พบว่า สารผสมเพิ่ม 4 ชนิด สามารถเพิ่มความแข็งแรงของดินซีเมนต์ถึงร้อยละ 100-150 ประกอบด้วย โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไฮดรอกไซด์ โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต และโซเดียมซัลเฟต

2.3.4 ปริมาณความชื้นและการบดอัด

ปริมาณความชื้นมีผลต่อสมบัติของดินซีเมนต์ เนื่องจาก ปริมาณความชื้นในส่วนผสมของดินซีเมนต์จะช่วยให้ดินซีเมนต์มีความหนาแน่นสูงสุดแล้ว ยังทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันสมบูรณ์ด้วยนอกจากนี้ ปริมาณความชื้นยังมีผลต่อดินแตกต่างกันตามลักษณะของดินอีกด้วย โดยดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดินเหนียวหรือดินเม็ดละเอียดควรใช้ปริมาณความชื้นมากกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย ส่วนดินทรายหรือดินเม็ดหยาบควรใช้ความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย จะทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงและความคงทนสูง ดังรายงานผลการศึกษาอิทธิพลของความชื้นต่อกำลังอัด (Felt, 1955 and Davidson et al.,1962) พบว่า ปริมาณความชื้นและความหนาแน่นมีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ สำหรับดินทรายควรทำการบดอัดด้วยปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ส่วนดินเหนียวควรบดอัดด้วยปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเล็กน้อยจึงจะให้กำลังอัดสูงสุด ทั้งนี้ การอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่นของดิน (Ruenkraitersa,1982) ที่บดอัดตามวิธีของพร็อกเตอร์ (Proctor) มาใช้กับดินซีเมนต์นั้น พบว่า ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมนอกจากจะทำให้ความหนาแน่นสูงสุดแล้ว ยังทำให้ซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์ด้วย สำหรับดินซีเมนต์ความหนาแน่นสูงสุดไม่จำเป็นว่าจะทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงและมีความคงทนมากที่สุดเสมอไป จากผลการทดลองหาค่าความคงทนด้วยวิธี Freeze-Thaw ของดินตะกอนและดินเหนียวผสมซีเมนต์ พบว่า ความคงทนจะมีค่าสูงสุดเมื่อทำการบดอัดที่มีปริมาณความชื้นสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย หากทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม จะทำให้ค่าความคงทนลดลง สำหรับการทดลองในดินทรายผสมซีเมนต์ พบว่า ความแข็งแรงของดินซีเมนต์มีค่าสูงสุดเมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย

2.3.5 การบ่มดินซีเมนต์

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

2.3.6 ระยะเวลาในการผสม

การเพิ่มระยะเวลาในการผสมดินซีเมนต์มีผลทำให้ดินซีเมนต์มีค่ากำลังอัดลดลง ดังผลการศึกษาของ Marshall ในปี ค.ศ.1954 ที่ได้ศึกษาผลการห้วงเวลาการผสมระหว่างการผสมขึ้น และการบดอัด พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการผสมเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาของ Felt ในปี ค.ศ.1955 ที่ได้ศึกษาอิทธิพลของการห้วงเวลาต่อกำลังอัดและความคงทน โดยผสมให้นานขึ้น แล้วทิ้งไว้ก่อนบดอัด พบว่า ผลการทดสอบกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดิน 3 ชนิด คือ ดินกลุ่ม A-2 (LL=26, PI=11) ดินกลุ่ม A-4 (LL=3.5, PI=12) และดินกลุ่ม A-6-7 (LL=47, PI=26) มีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อเวลาการผสมนานขึ้น การห้วงเวลาการผสมแบบหยุดเป็นครั้งคราว มีผลเสียน้อยกว่าแบบหยุดผสมเลย จากรายงานผลการศึกษาของ Ingles and Metcalf ในปี ค.ศ. 1972 ซึ่งได้ทดสอบดิน 2 ชนิด คือ Medium Clay และ Sandy Gravel เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังอัดกับเวลาที่ใช้ในการผสมดินซีเมนต์ พบว่า หากเพิ่มเวลาในการผสมดินซีเมนต์ 1-2 ชั่วโมง กำลังอัดลดลงมากกว่าร้อยละ 50

2.4 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีต ที่ใช้มากที่สุดในปัจจุบันคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับงานที่นำไปใช้ นอกจากนี้ยังมีปูนซีเมนต์อื่นที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เหมาะกับงานที่หลากหลาย โดยเฉพาะด้านความแข็งแรง ความทนทาน ความสวยงาม และการใช้งานเฉพาะด้าน คุณสมบัติของปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่เป็นวัตถุดิบและกรรมวิธีการผลิต สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันในขั้นตอนการเผาเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ การปรับส่วนประกอบของวัตถุดิบจะทำให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป

2.4.1 การผลิตปูนซีเมนต์

การผลิตปูนซีเมนต์ในปัจจุบันแตกต่างจากเดิมบ้างแต่ยังคงใช้วัสดุหลักที่ใช้ในสมัยแรก และให้ความสำคัญที่คุณภาพของปูนซีเมนต์ที่ผลิต และประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต การผลิตปูนซีเมนต์มีความแพร่หลายและได้รับความนิยมสูงเพราะวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีปริมาณมากและหาได้ง่ายในที่ต่าง ๆ ทั่วโลก

1. วัตถุดิบ

วัตถุดิบ ที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ

- ธาตุที่เป็นวัสดุผลิตปูน เป็นออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ได้แก่ หินปูน และหินชอล์ก
- วัสดุอะลูมินาเซียส เป็นออกไซด์ของธาตุซิลิกอน และอลูมิเนียม ได้แก่ ดินเหนียว หินเชลหรือหินดินดาน และหินชนวน ในบางครั้ง ดินที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีทั้งออกไซด์ของ

แคลเซียมและซิลิกอนได้แก่ ดินมาร์ล นอกจากนี้ การผลิตปูนซีเมนต์ยังต้องการวัตถุดิบอย่างอื่น ได้แก่ ออกไซด์ของเหล็กซึ่งได้จากดินลูกรัง ออกไซด์ของอลูมิเนียมและเหล็กช่วยให้ปฏิกิริยาในเตาเผาเกิดได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังต้องการยิปซัม เพื่อหน่วงปฏิกิริยาไม่ให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวเร็วเกินไปโดยบดรวมกับปูนเม็ดในขั้นตอนสุดท้าย

2. กรรมวิธีในการผลิต

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

ในกระบวนการผลิตแบบเปียก วัตถุดิบจะผสมกับน้ำตามสัดส่วนที่กำหนด โดยปกติถ้าใช้ดินเหนียวและหินชอล์กจะใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อน้ำประมาณ 1:3 จากนั้นจะบดสัดส่วนผสมให้ละเอียดในหม้อบดละเอียดเปียก น้ำโคลนชื้นที่ได้จะนำไปผ่านตะแกรงละเอียดแล้วส่งเข้าเตาเผา วัตถุดิบที่ป้อนเข้าเตาเผาจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 35 ถึง 50

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

เตาเผาโรงงานปูนซีเมนต์เป็นเตาแบบหมุน ทำด้วยเหล็กกล้ารูปทรงกระบอกข้างในบุด้วยอิฐทนไฟ เตาเผาแบบหมุนมีความเอียงจากแนวราบเล็กน้อยประมาณ 3 ถึง 5 ในร้อย และหมุนรอบแกนของทรงกระบอกอย่างช้า ๆ ประมาณ 1 ถึง 3 รอบต่อนาที เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาเป็นถ่านหิน น้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติ วัตถุดิบจะป้อนเข้าทางส่วนบนของเตาสำหรับกระบวนการผลิตแบบเปียกวัตถุดิบอยู่ในเตาเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ถึง 2 ชั่วโมง 30 นาที และเป็นเวลา 30 นาที ถึง 1 ชั่วโมง สำหรับกรณีผลิตแบบแห้ง

กระบวนการที่เกิดขึ้นในเตาเผาสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ

1. การขจัดน้ำอิสระโดยการระเหย (Evaporation)

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

ในขั้นแรกวัตถุดิบที่ป้อนเข้าทางส่วนบนของเตาเผาจะได้รับความร้อนจากอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิ 250 ถึง 450 องศาเซลเซียสและขจัดน้ำอิสระออกไป อุณหภูมิวัตถุดิบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึง 600 องศาเซลเซียสที่จุดนี้มีวัตถุดิบเริ่มสลายตัวโมเลกุลน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์จะค่อยๆถูกขจัดออกไป เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาเบื้องต้น เกิดสารประกอบของแคลเซียมอลูมิเนตและเฟอร์ไรต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวช่วยให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิประมาณ 1,350 องศาเซลเซียส เกิดการหลอมละลายของแคลเซียมอลูมิเนตและเฟอร์ไรต์และเริ่มทำปฏิกิริยาเป็นปูนเม็ด วัตถุดิบจะหลอมละลายและประมาณร้อยละ 20 ถึง 30 จะกลายเป็นของเหลว เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส ส่วนผสมจะทำปฏิกิริยาเป็นปูนเม็ดก้อนกลมขนาด 3 ถึง 40 มิลลิเมตร ในส่วนท้ายสุดของเตาอุณหภูมิจะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วและปูนเม็ดจะไหลออกจากเตาเผาปูนเม็ดออกจากส่วนล่างของเตาเผาจะยังคงร้อนมาก และจะลดอุณหภูมิปูนเม็ด อัตราการลดลงของอุณหภูมิมิมีผลต่อความเป็นผลึกของปูนเม็ด ต่อจากนั้นนำปูนเม็ดมาบดร่วมกับยิปซัม ในหม้อบดปูนซีเมนต์ ปริมาณยิปซัมที่ใช้ประมาณร้อยละ 2.5 ถึง 3 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เพื่อหน่วงการก่อตัวอย่างรวดเร็วของปูนซีเมนต์

2.4.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การศึกษาอิทธิพลของสารประกอบทำให้สามารถปรับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานประเภทต่างๆมาตรฐานการทดสอบวัสดุตาม ATSM C 150 ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

1. ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ประเภทใช้กันมากในงานคอนกรีต ประมาณได้วาร์้อยละ 90 ของปูนซีเมนต์ที่ผลิตในสหรัฐอเมริกา เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษ กว่าธรรมดา และใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไป เช่น เสา คาน ฐานรากของอาคาร ถนน เป็นต้น ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังสูงสุดในระยะเวลาไม่รวดเร็วมากนักและให้ความร้อนปานกลาง ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราช้าง ตราพญานาคสีเขียว ตราที่พีไอสีแดง ตราภูเขา ตราดาวเทียม และตราเอกซีเมนต์สีน้ำเงิน เป็นต้น

2. ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ดัดแปลง เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนไม่สูงมากนักความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อต่ำ (ประเภทที่ 4) และให้กำลังใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่เกิดความร้อนและ

ทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตได้ปานกลาง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ใช้ค่อนข้างน้อยในประเทศไทยที่มีอยู่ได้แก่ปูนซีเมนต์ ตราพญานาค 7 เคียร เป็นต้น

3. ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็วเป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรก ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงเพราะมีปริมาณ สูงและความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาก เหมาะสำหรับงานที่ต้องการใช้งานเร็ว เช่น งานซ่อมแซมหรืองานที่ต้องการถอดแบบเร็ว เช่น เสาเข็มคอนกรีต เสาไฟฟ้าคอนกรีต ผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูป ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ ได้แก่ ตราเอราวัณ ตราพญานาคสีแดง ตราทีพีไอสีดา และตราเอกซีเมนต์สีแดง เป็นต้น

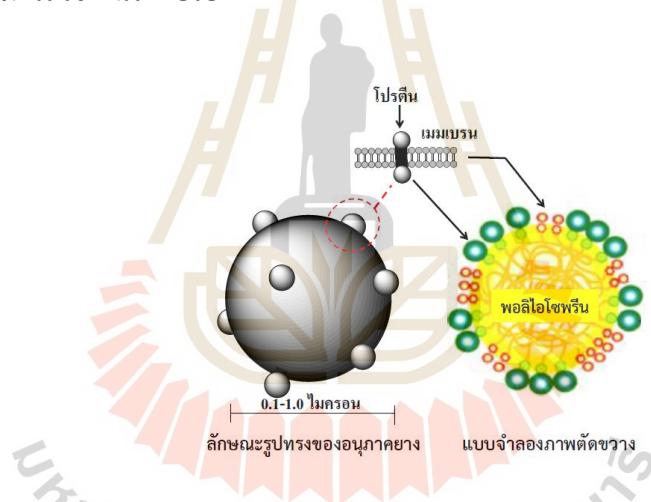
4. ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต่ำมากเพราะปริมาณของ C_3S ต่ำ คือ โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณร้อยละ 25 ที่ 30 แต่จะมี C_2S ที่ค่อนข้างสูง คือโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 50 ถึง 60 ปูนซีเมนต์ชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับใช้ในการก่อสร้างคอนกรีตหยาบ (Mass Concrete) หรือโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เช่น เขื่อนคอนกรีต ตอม่อขนาดใหญ่เนื่องจากมีคุณสมบัติในการให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำปูนซีเมนต์ชนิดนี้ไม่มีจำหน่ายในท้องตลาดในประเทศไทยต้องสั่งโดยตรงจากผู้ผลิต

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

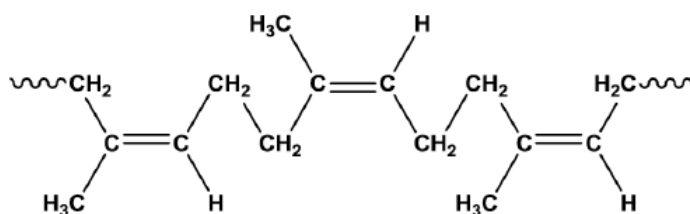
2.5 น้ำยางพารา

ยางพาราหรือยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย การส่งออกยางธรรมชาติส่วนมากอยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ผ่านการแปรรูป เช่น น้ำยางข้น ยางแผ่นรมควัน หรือยางทิ้ง โดยประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกน้ำยางข้นรายใหญ่ของโลก ในปี พ.ศ.2562 น้ำยางข้นมีปริมาณการผลิต 1,122,050 ตัน มีมูลค่า 35,585.40 ล้านบาท (<http://rubber.oie.go.th/>) น้ำยางข้นส่วนที่เหลือจากการส่งออกจะใช้ในอุตสาหกรรมภายในประเทศ เพื่อผลิตถุงมือยาง ยางฟองน้ำยางอนำมัย จุกนมยาง ยางยืด ลูกโป่ง และผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์

น้ำยางธรรมชาติจากต้นยางพาราเป็นของเหลวที่มีองค์ประกอบของแข็ง (Total Solid Content; TSC) ประมาณร้อยละ 36 และมีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 60 โดยคิดเป็นน้ำหนักยางแห้ง (Dry Rubber Content; DRC) ร้อยละ 33 สารจำพวกโปรตีนร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 1.5 ซีลีไคน์ร้อยละ 1 น้ำตาลร้อยละ 1 และมีสารประกอบอื่น ๆ เช่น กรดอะมิโน ลิพิด ฟอสโฟลิพิด และเกลือของกรดไขมัน อยู่ประมาณร้อยละ 0.5 ถึงร้อยละ 1.60 (Nawamawat, 2011) ขนาดอนุภาคของยางธรรมชาติอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.0 ไมครอน มีลักษณะค่อนข้างกลม โดยมีโปรตีนและเมมเบรน ล้อมรอบอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของอนุภาค ดังรูปที่ 2.2 ยางธรรมชาติเป็นโพลิเมอร์ทางธรรมชาติที่ประกอบด้วย อะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจน มีโครงสร้างทางเคมีคือ ซิส-1, 4-พอลิไอโซพรีน (cis-1, 4-polyisoprene) ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวสูง โดยประกอบด้วยพันธะคู่ของคาร์บอน (C=C) เป็นจำนวนมาก จึงทำให้ยางธรรมชาติเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อถูกแสงแดดหรือหรือความร้อน โดยสังเกตได้จากยางจะแปรสภาพจากเดิมที่สามารถยืดหยุ่นได้ดี กลายเป็นแข็งเปราะและไม่สามารถใช้งานได้ต่อไป



รูปที่ 2.2 แบบจำลองอนุภาคยางธรรมชาติ (Nawamawat, 2011)



รูปที่ 2.3 ยางพารามีโครงสร้างทางเคมีแบบ ซิส-1, 4-พอลิไอโซพรีน (สุวดี ก้องพารากุล, 2556)

ยางละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด จึงสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิ จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ยางพาราที่มีสมบัติที่โดดเด่นแตกต่างจากยางสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เป็นผลมาจากโครงข่ายที่เกิดจากการเชื่อมโยงตามธรรมชาติของหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่โมเลกุล โดยสมบัติที่โดดเด่น เช่น สมบัติด้านความยืดหยุ่น (Elasticity) ความทนทานต่อการขีดสี การกระดอน ทนทานต่อการฉีกขาด การเหนียวติดกัน (Track) ดีเยี่ยม แต่ทั้งนี้ ยางพาราก็มีสมบัติบางประการที่ด้อยกว่ายางสังเคราะห์ เช่น การเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อถูกแสงแดดและความร้อน การบวมตัวเมื่อสัมผัสกับตัวทำละลายอินทรีย์ (สุวดี ก้องพารากุล, 2556) นอกจากนี้ ยางพารายังมีสมบัติไฮโดรโฟบิก (Hydrophobicity) หรือความไม่ชอบน้ำ (ชัยวุฒิ วัตจิง, 2558) ซึ่งทำให้โครงสร้างของยางธรรมชาติไม่สามารถแตกตัวให้ออออน หรือเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้วซึ่งไม่สามารถยึดติดกับโมเลกุลของน้ำหรือไม่เปียกน้ำ และไม่สามารถขยายขนาดหรือบวมเมื่อสัมผัสกับน้ำ จากสมบัติดังกล่าวยางพาราจึงมีความสามารถในการดูดน้ำได้น้อยมาก

โดยทั่วไปน้ำยางสดที่ออกมาจากต้นยางจะคงสภาพความเป็นน้ำยางได้ไม่เกิน 3 ถึง 6 ชั่วโมง เนื่องจากแบคทีเรียในอากาศ และจากเปลือกของต้นยางจะลงไปปนน้ำยาง และกินสารอาหารที่อยู่ในน้ำยาง เช่น โปรตีน น้ำตาล เป็นต้น ทำให้แบคทีเรียเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว แต่สิ่งที่เกิดขึ้นจากการย่อยของแบคทีเรียคือ ก๊าซชนิดต่าง ๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน และกรดไขมันระเหยได้ (Volatile Fatty Acid) เมื่อปริมาณกรดที่ระเหยภายในน้ำยางเพิ่มมากขึ้น น้ำยางจะเกิดการสูญเสียสภาพ สังกะสีได้จากการที่น้ำยางจะค่อย ๆ มีความหนืดมากขึ้น เพราะอนุภาคยางเริ่มจับตัวเป็นเม็ดเล็ก ๆ และค่อยขยายเป็นก้อนใหญ่ขึ้น จนน้ำยางสูญเสียสภาพ เกิดการบูดเน่า และมีกลิ่นเหม็น ซึ่งอัตราการเกิดกระบวนการทั้งหมดจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างไม่ว่าจะเป็นเรื่องอุณหภูมิสภาพแวดล้อม ความคงตัวของน้ำยาง พันธุ์ยาง เพื่อป้องกันการสูญเสียสภาพของน้ำยางสด จึงต้องเติมสารเคมีบางชนิดลงไปเพื่อเก็บรักษาน้ำยางให้คงสภาพเป็นของเหลว ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในการเก็บรักษาน้ำยางเรียกว่า สารรักษาสภาพน้ำยาง (Preservative) เช่น แอมโมเนีย (Ammonia) โซเดียมซัลไฟต์ (Sodium sulfite) ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) เป็นต้น

น้ำยางข้น คือ น้ำยางสดที่ทำให้เข้มข้นโดยการหมუნเหวี่ยงหรือการแยกครีม เพื่อแยกส่วนที่เป็นเนื้อยางออกจากเซรุ่ม และเพิ่มปริมาณเนื้อยางแห้งจากร้อยละ 30 เป็นร้อยละ 60 สำหรับวิธีการหมუნเหวี่ยง ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันในประเทศไทย และเพิ่มปริมาณเนื้อยางแห้งจากร้อยละ 30 เป็นร้อยละ 64 สำหรับวิธีการแยกครีม เนื่องจากน้ำยางสดมีปริมาณน้ำมากเกินไปไม่เหมาะที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนส่ง

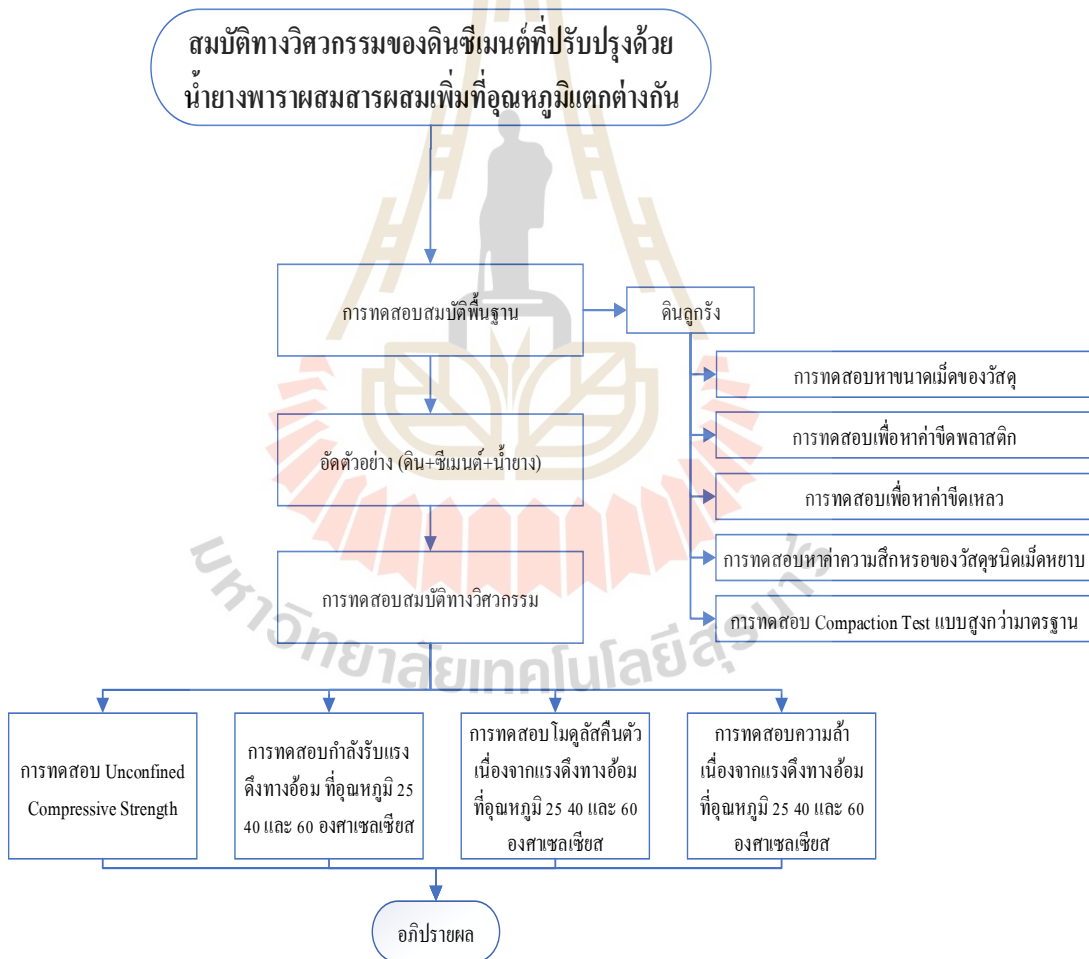
กระบวนการผลิตน้ำยางข้น เริ่มจากการรวบรวมน้ำยางสด จากพื้นที่เพาะปลูก และมีการตรวจสอบคุณภาพและผสมสารเคมี ก่อนที่จะนำเข้าสู่เครื่องเหวี่ยง (Centrifuge) เพื่อทำเป็นน้ำยางข้นที่มีความเข้มข้นได้ตั้งแต่ร้อยละ 30 ถึงร้อยละ 60 ในปัจจุบันการรักษาสภาพของน้ำยางข้นส่วนใหญ่ใช้สารแอมโมเนีย ซึ่งจากแนกกลุ่มของน้ำยางข้นออกเป็น 2 กลุ่มตามลักษณะของสารเคมีที่ใช้ในการรักษาสภาพ คือ

1. น้ำยางข้นที่รักษาสภาพด้วยแอมโมเนียสูง (High Ammonia Latex; HA) คือ น้ำยางข้นที่รักษาสภาพด้วยสารละลายแอมโมเนียในปริมาณร้อยละ 0.7
2. น้ำยางข้นที่รักษาสภาพด้วยแอมโมเนียต่ำ (Low Ammonia Latex; LA) เป็นน้ำยางข้นที่รักษาสภาพด้วยแอมโมเนียร่วมกับสารรักษาสภาพปริมาณร้อยละ 0.2 ร่วมกับสารเคมีชนิดอื่น น้ำยางข้นที่ได้รับการผสมสารเคมีแล้ว อาจเกิดปฏิกิริยาทางเคมีบางประการทำให้น้ำยางมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปบ้างเล็กน้อย



บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่อุณหภูมิต่างกัน เพื่อให้การดำเนินงานบรรลุวัตถุประสงค์การวิจัยดังกล่าว ผู้วิจัยได้กำหนดแผนดำเนินการวิจัย ดังรูปที่ 3.1 โดยจะแสดงรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินงานตามลำดับ ในข้อที่ 3.1 – 3.3 ดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยนี้ประกอบด้วย ดินลูกรัง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และน้ำ ยางพารา โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 ดินลูกรัง

ดินลูกรัง เป็นวัสดุหลักในส่วนผสมการผลิตดินซีเมนต์ โดยการใช้ดินลูกรัง จากแหล่งดินในเขต อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะของดินลูกรัง

3.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1-2547

3.1.3 น้ำยางพารา

น้ำยางพารา ที่ใช้น้ำยางพาราจากธรรมชาติซึ่งได้จากการยางแห่งประเทศไทย มีโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) เป็นสารลดแรงตึงผิวเพื่อกำจัดโปรตีน และมีการเติมซิงค์ออกไซด์, แคลเซียมคาร์บอเนต, สังกะสี 2-mercaptobenzothiazole (ZMBT), และสารกำมะถัน เพื่อปรับปรุงความสามารถในการทำงานและคุณสมบัติที่ต้องการของน้ำยางธรรมชาติ โดยคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.3 น้ayangธรรมชาติ

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติน้ayangธรรมชาติ

Properties	Values
Sludge content (%w _t)	2.46
Coagulum content (%w _t)	0.024
Specific gravity (G _s)	0.96
pH	8

3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินลูกรัง

3.2.1 การทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Sieve Analysis)

การกระจายของขนาดเม็ดดิน หมายถึงการที่มวลดินประกอบด้วยเม็ดดินหลายขนาดต่าง ๆ กัน เช่น ตั้งแต่ 10 ซม. ลงมาจนกระทั่ง 0.0002 มม. ซึ่งคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของมวลดินจะขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดดิน การกระจายของขนาดเม็ดดินแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเม็ดดินในลอการิทึม (Logarithm) อยู่บนแกนนอน และร้อยละโดยน้ำหนักของเม็ดที่มีขนาดเล็กกว่าที่ระบุ (Percent) อยู่บนแกนตั้ง ซึ่งเรียกว่ากราฟการกระจายของขนาดเม็ดดิน (Grainsize Distribution Curve) วิธีการทดสอบนี้ เป็นการหาการกระจายของขนาดเม็ดดิน (Particle Size Distribution) ทั้งชนิดเม็ดละเอียดและหยาบ โดยให้ผ่านตะแกรงจากขนาดใหญ่ จนถึงขนาดเล็กที่มี

ขนาดช่องผ่าน 0.075 มม. (เบอร์ 200) แล้ว เปรียบเทียบน้ำหนักที่ผ่านหรือค้างตะแกรงขนาดต่าง ๆ กับน้ำหนักทั้งหมดของตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D422

3.2.2 การทดสอบเพื่อหาค่าขีดพลาสติก (Plastic Limit : PL)

ขีดพลาสติกของดิน หมายถึง ปริมาณน้ำจํานวนน้อยที่สุด ที่วัดโดยกรรมวิธีทดสอบที่จะกล่าวต่อไป ซึ่งยังคงทำให้ดินมีสภาพเป็นพลาสติก โดยมีค่าเป็นร้อยละของน้ำต่อน้ำหนักดินอบแห้งค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plastic : PI) ของดิน หมายถึง ปริมาณน้ำในดินช่วงหนึ่ง ซึ่งดินนั้นยังคงสภาพเป็นพลาสติก มีค่าเป็นผลต่างระหว่างค่าขีดเหลว และขีดพลาสติกของดินนั้นวิธีการทดสอบนี้เป็นการหาค่าขีดพลาสติกของดินตามมาตรฐาน ASTM D424

3.2.3 การทดสอบเพื่อหาค่าขีดเหลว (Liquid Limit : LL)

ขีดเหลวของดินคือ ปริมาณน้ำเป็นร้อยละที่ผสมอยู่ในดิน ซึ่งพอเหมาะที่ทำให้ดินเปลี่ยนจากภาวะพลาสติก (Plastic) มาเป็นภาวะเหลว (Liquid) โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักของเนื้อดินนั้นเมื่ออบแห้ง ตามมาตรฐาน ASTM D424

3.2.4 การทดสอบหาค่าความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (Los Angeles Abrasion test)

การทดสอบหาค่าความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ เพื่อหาค่าน้ำหนักของวัสดุสูญเสียไป เนื่องจากการถูกขัดสี การถูกบดทับ เพื่อหาค่าความต้านทานการสึกกร่อนของหินให้ทราบถึงคุณภาพของหินในการต้านทานการสึกกร่อนและการกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM C 131

3.2.5 การทดสอบ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Density test)

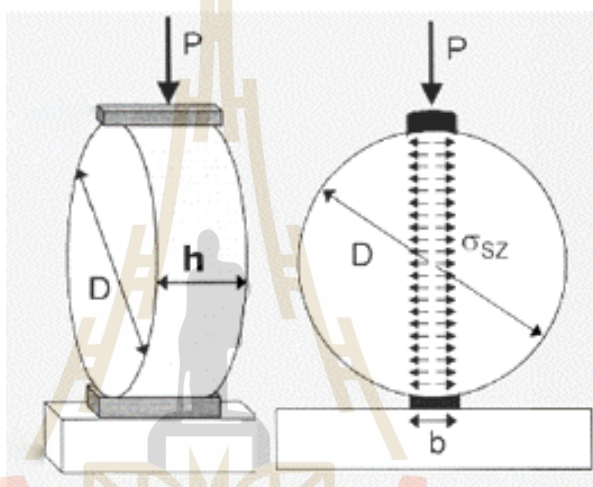
การทดลอง Compaction Test วิธีนี้เป็นการทดลองโดยวิธี Dynamic Compaction เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแห้งสูงสุดของดินกับปริมาณน้ำที่เหมาะสมใช้ในการบดอัดเพื่อให้ได้ความแน่นสูงสุดตามมาตรฐาน ASTM D 1557

3.2.6 การทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน

วิธีการทดสอบนี้ครอบคลุมถึงการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน ซึ่งแท่งตัวอย่างจะถูกแรงกดลงทางแนวดิ่งโดยไม่มีแรงดันด้านข้าง วิธีการทดสอบนี้เป็นวิธีหาค่าประมาณของแรงยึดเกาะ (COHESION) ของดินโดยวิธีง่าย ๆ ซึ่งทำได้อย่างรวดเร็วขอบาย Unconfined Compressive Strength คือ ค่าแรงอัด (Compressive Load) สูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งแท่งตัวอย่างดินรูปทรงกระบอกหรือรูป Prismatic จะรับได้ การหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดินในสภาพ Unconfined Compressive Strength อัตราการเพิ่มแรงอัดในระหว่างการทดลอง จะควบคุมโดย ความเครียด (Strain) หรือควบคุมโดยความเค้น (Stress) ตามมาตรฐาน ASTM D2166

3.2.7 การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength, ITS)

ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength: ITS) คือค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงของส่วนผสม สำหรับวิธีการทดสอบจะอ้างอิงตามมาตรฐานวิธีการทดสอบ ASTM D6931 Standard Test Method for Indirect Tensile Strength of Bituminous Mixtures โดยป้อนน้ำหนักกระทำด้วยอัตราเร็วคงที่ (Static Load) เท่ากับ 2 นิวตัน/นาที่ จนกระทั่งก้อนตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักกระทำสูงสุดเพื่อนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม โดยใช้สมการที่ 2.1



รูปที่ 3.4 การทดสอบหากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength, ITS)

$$ITS = \frac{2P}{\pi Dh} \dots \dots \dots (2.1)$$

- เมื่อ ITS คือ กำลังรับแรงดึงทางอ้อม, เมกะปาสคาล (MPa)
 P คือ แรงกระทำสูงสุด, นิวตัน (N)
 D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของตัวอย่าง, มิลลิเมตร (mm)
 h คือ ความหนาเฉลี่ยของตัวอย่าง, มิลลิเมตร (mm)

3.2.8 การทดสอบโมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Resilient Modulus)

การทดสอบนี้เพื่อหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus : MR) เนื่องจากแรงดึงทางอ้อม อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D4123 “Standard Test Method for Indirect Tensile

Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures” และ AASHTO TP31-94 “Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension” การทดสอบกระทำที่อุณหภูมิ 35 °C โดยกำหนด Pulse width เท่ากับ 100 milliseconds (ให้น้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่างทุกๆ 1.0 วินาที) การกดน้ำหนักจะกำหนดเป็นรูปแบบ Haversine โดยมีน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 15 ของ ITS การจัดวางก้อนตัวอย่างในเครื่องทดสอบจะเป็นลักษณะเดียวกันกับการทดสอบกำลังดึงทางอ้อม แต่จะมีการติดตั้ง Linear Variable Differential Transducers (LVDT) เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้านข้าง การทดสอบจะหยุดเมื่อจำนวนครั้งของการกดน้ำหนักถึงรอบที่ 200 ค่าโมดูลัสคืนตัวเป็นค่าเฉลี่ย 5 ค่าสุดท้ายของการทดสอบ ค่าโมดูลัสคืนตัวคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$M_R = \frac{P(0.27+v)}{(\Delta H)D} \dots\dots\dots(2.2)$$

- เมื่อ M_R คือ Resilient modulus (เมกะปาสคาล)
 P คือ น้ำหนักที่ใช้กระทำ (นิวตัน)
 D คือ ความหนาของก้อนตัวอย่าง (มิลลิเมตร)
 ΔH คือ การทรุดตัวในแนวตั้ง (มิลลิเมตร)
 V คือ อัตราส่วนปัวซอง

3.2.9 การทดสอบความล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue)

ความล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue) คือค่าที่แสดงความทนทานของตัวอย่างเมื่อมีน้ำหนักมากระทำซ้ำจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ สำหรับวิธีการทดสอบจะอ้างอิงตามมาตรฐานวิธีการทดสอบ BS EN 12697-24:2018 Bituminous mixtures. Test methods. Resistance to fatigue โดยใช้ค่าหน่วยแรงดึงทางอ้อมในการทดสอบความล้าเท่ากับร้อยละ 70 ของแรงดึงทางอ้อม โดยจะให้แรงกระทำซ้ำจนกระทั่งก้อนตัวอย่างวิบัติ ทำการบันทึกค่าจำนวนรอบที่วิบัติ และการเสียรูปในแนวตั้ง เพื่อไปคำนวณความเครียดในแนวตั้ง หาค่าอายุการล้า

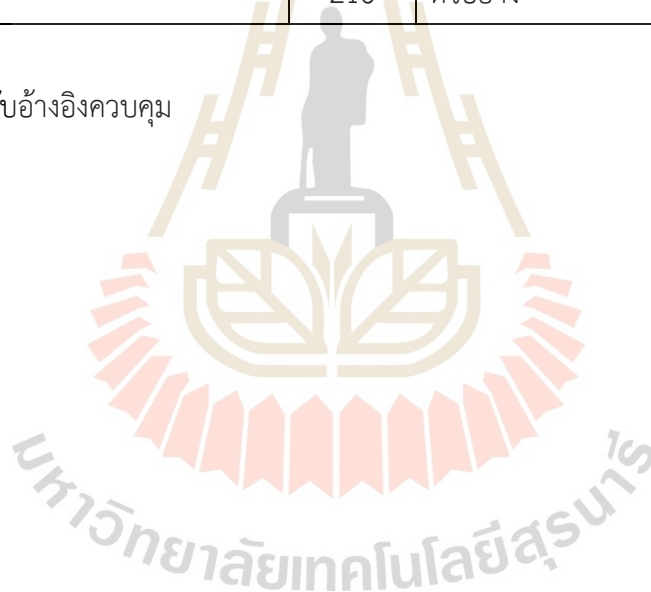
3.3 เงื่อนไขการทดสอบ

การศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่างทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

ตัวแปร	จำนวน	หมายเหตุ
การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม	4	UCS ,ITS, RM และFAT
ปริมาณปูนซีเมนต์	1	ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9
ปริมาณน้ำยางพารา	5	ร้อยละ 0*, 10, 15, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์
อุณหภูมิที่ทดสอบ	3	25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส
อายุบ่ม	1	7 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ส่วนผสม	3	ตัวอย่าง
รวม	216	ตัวอย่าง

* ตัวอย่างสำหรับอ้างอิงควบคุม



บทที่ 4

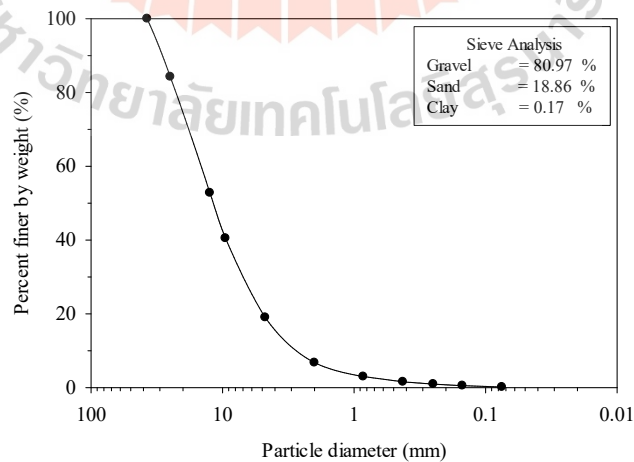
ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอการศึกษากำลังรับแรงอัดแกนเดียว กำลังรับแรงดึงทางอ้อม โมดูลัสการคืนตัว เนื่องจากแรงดึงทางอ้อม และความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าจากแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยาพาราผสมสารผสมเพิ่ม โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยาพาราผสมสารผสมเพิ่มที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิการทดสอบที่เพิ่มสูงขึ้น ตั้งอุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริงกับถนนในประเทศไทย

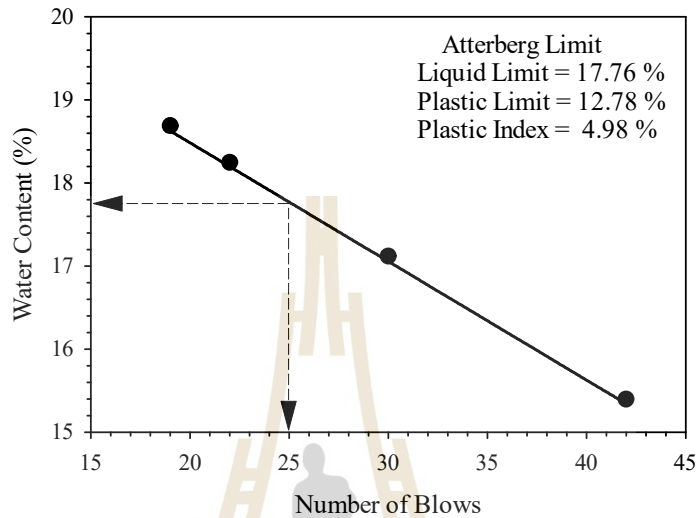
4.2 ผลการทดสอบสมบัติเบื้องต้นของดินที่ใช้ในงานวิจัย

ดินตัวอย่างเป็นดินลูกรัง จากแหล่งดินในเขตอำเภอขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา เมื่อทำการทดสอบกระจายตัวของเม็ดดิน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าดินลูกรังประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นกรวดร้อยละ 80.97 ทรายร้อยละ 18.86 และดินเหนียวร้อยละ 0.17 (รูปที่ 4.1) ดินตัวอย่างมีขนาดเม็ดโตที่สุดไม่เกิน 37.50 มิลลิเมตร และมีส่วนที่ผ่านตระแกรงขนาด 2.00 มิลลิเมตร (เบอร์ 10) ร้อยละ 5.60 และส่วนที่ผ่านตระแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ร้อยละ 0.17



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของเม็ดดิน

ผลการทดสอบหาค่าขีดเหลว ค่าขีดพลาสติก และดัชนีพลาสติก แสดงดังรูปที่ 4.2 ดินตัวอย่างมีค่าขีดเหลว ค่าขีดพลาสติก และดัชนีพลาสติก เท่ากับร้อยละ 17.8, 12.8 และ 5.0 ตามลำดับ โดยค่าความสึกหรอของดินตัวอย่างมีค่าเท่ากับร้อยละ 37.7



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและจำนวนการตกระทบ

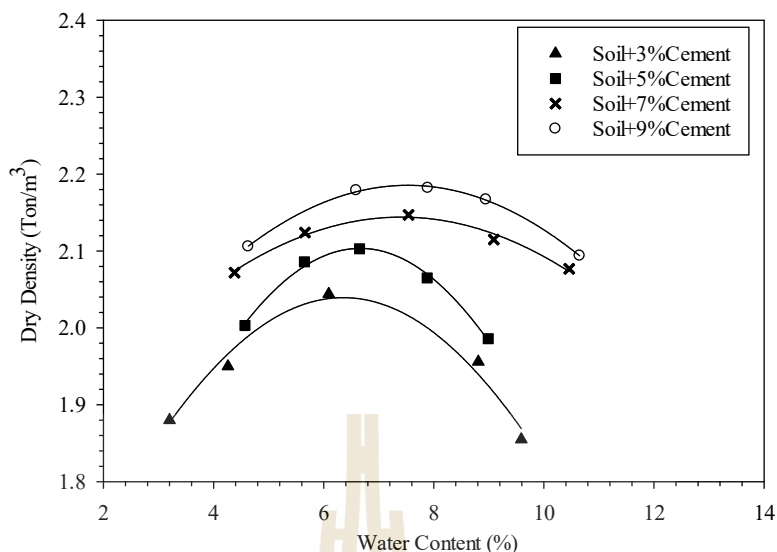
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติการกระจายขนาดของเม็ดดิน ความเป็นพลาสติกและความสึกหรอของดินตัวอย่างกับมาตรฐานชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ (ทล.(ท) 204-2556) พบว่าเม็ดดินมีขนาดโตสุดไม่เกิน 50 มิลลิเมตร มีส่วนที่ผ่านตระแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่เกินร้อยละ 25 ดินตัวอย่างมีขีดเหลวไม่เกินร้อยละ 40 มีดัชนีพลาสติกไม่เกินร้อยละ 15 และมีค่าความสึกหรอไม่เกินร้อยละ 60 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งผ่านมาตรฐานชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ (ทล.(ท) 204-2556)

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติเบื้องต้นของดินเทียบกับมาตรฐานชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ (ทล.(ท) 204-

2556)

Sample properties	Soil sample	Standard for soil Cement
		of base materials (DH-S204/2556)
		Values
Largest particle size (mm)	25	≤50
Percent passing of Sieve No. 200 (%)	0.17	≤25
Los Angeles abrasion (%)	37.7	≤60
Liquid limit LL (%)	17.8	≤40
Plastic limit PL (%)	22.8	-
Plasticity index PI (%)	5	≤15
Specific gravity (Gs)	2.77	-
Maximum dry density (ton/m ³)	2.14	-
Optimum water content (%)	7.41	-

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินตัวอย่างที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนักของดินลูกรังแห้ง แสดงในรูปที่ 4.3 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่าความหนาแน่นแห้งของดินเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสมทำให้เกิดค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด เมื่อเพิ่มน้ำให้มากขึ้นจากจุดปริมาณน้ำที่เหมาะสมแล้วค่าความหนาแน่นแห้งมีค่าลดลง เมื่อมีการปรับปรุงดินลูกรังด้วยปริมาณซีเมนต์ที่ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 พบว่า ดินซีเมนต์มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด 2.04, 2.10, 2.14 และ 2.19 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนปริมาณความชื้นที่เหมาะสมอยู่ที่ ร้อยละ 6.39, 6.53, 7.42 และ 7.69 ตามลำดับ ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ จากการผสมดินกับซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 ส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม เพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนการผสมปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น

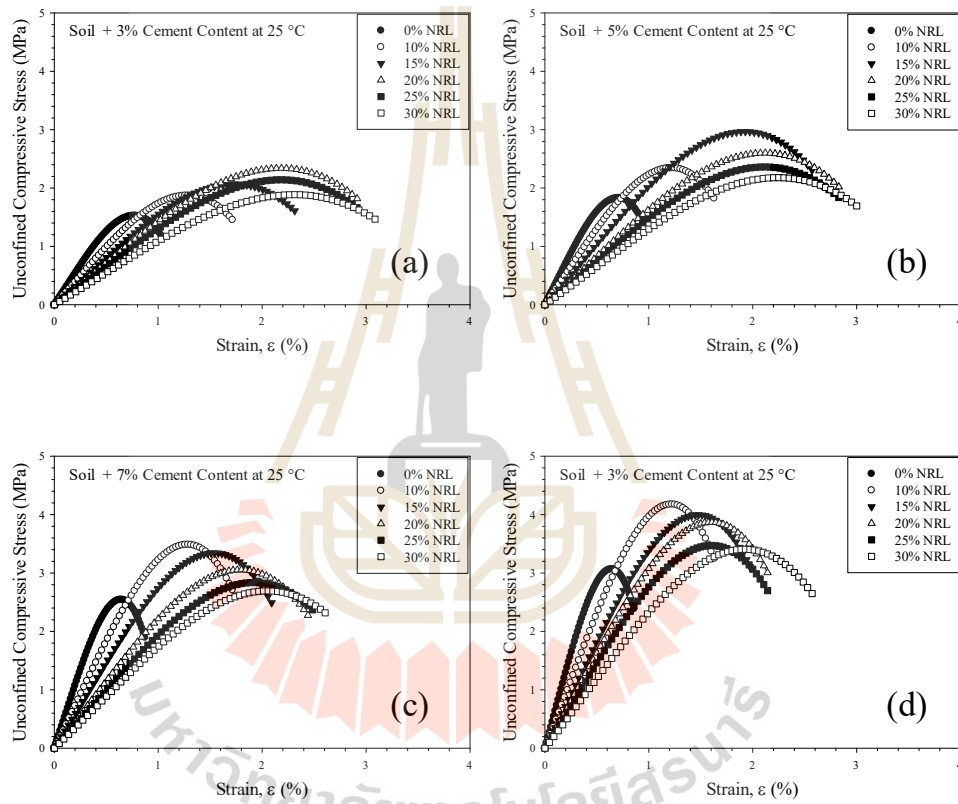


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้น

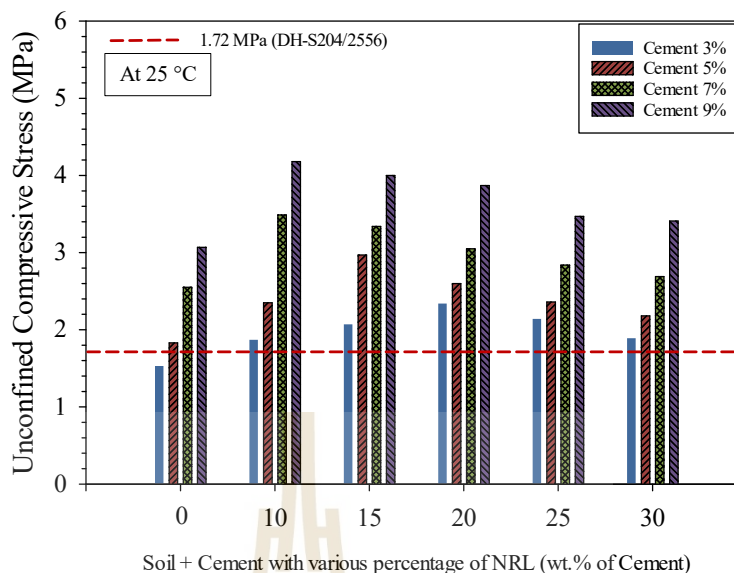
4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์กับอัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่าง ที่ปริมาณซีเมนต์ที่ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 พบว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ไม่มีการปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามร้อยละซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดแกนเดียวที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 คือ 1.53, 1.83, 2.55 และ 3.07 เมกะปาสคาล ตามลำดับ เมื่อมีการปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่เพิ่มขึ้น จนมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่เหมาะสม เมื่อเพิ่มน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มมากกว่าจุดที่เหมาะสมแล้วค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์จะมีค่าลดลง ยกตัวอย่างเช่น ที่ปริมาณซีเมนต์ที่ร้อยละ 3 พบค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์คือ 1.87, 2.07, 2.34, 2.14 และ 1.89 เมกะปาสคาล สำหรับอัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่ร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่เหมาะสมที่ให้กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ร้อยละ 3 สูงสุดคือการแทนที่น้ำยางร้อยละ 20 ส่วนที่ปริมาณซีเมนต์ที่ร้อยละ 5, 7 และ 9 พบค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุดของดินซีเมนต์คือ 2.97, 3.49 และ 4.18 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และอัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่เหมาะสมที่ให้กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์สูงสุดคือที่ร้อยละ 15, 10 และ 10 สำหรับซีเมนต์ร้อยละ 5, 7 และ 9 ตามลำดับ จากความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่จุดวิบัติและกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ จะเห็นว่าความเครียดที่จุดวิบัติมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามอัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพารา

ผสมสารผสมเพิ่มที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ที่ดินซีเมนต์ร้อยละ 3 เกิดการวิบัติที่ความเครียดประมาณ ร้อยละ 3.04, 3.16, 3.35, 3.58 และ 3.70 สำหรับอัตราส่วนการแทนที่น้ำยาพาราผสมสารผสมเพิ่ม ร้อยละ 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 ตามลำดับ ซึ่งแนวโน้มผลการทดสอบเป็นดังเช่นเดียวกันสำหรับ ดินซีเมนต์ร้อยละ 5, 7 และ 9 โดยการแทนที่น้ำยาพาราจะส่งผลให้ความเครียดที่จุดวิบัติมีค่า เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าน้ำยาพาราผสมสารผสมเพิ่มสามารถเพิ่มแรงเฉือนให้กับดินซีเมนต์ (Yaowarat et al. 2020)



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์กับความเครียดที่อัตราส่วน การแทนที่น้ำยาพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกันและปริมาณซีเมนต์ที่ ร้อยละ (a) 3, (b) 5, (c) 7 และ (d) 9



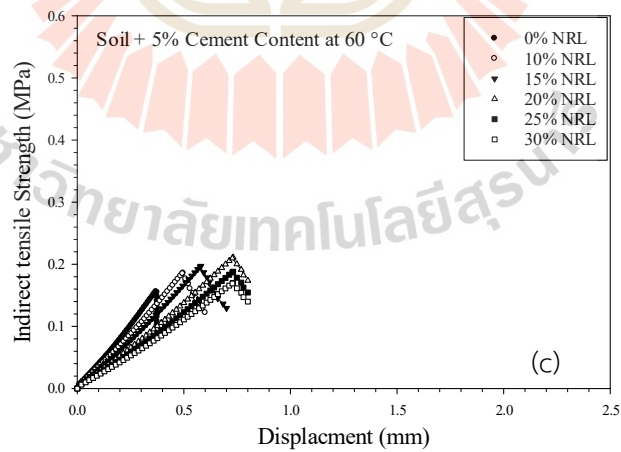
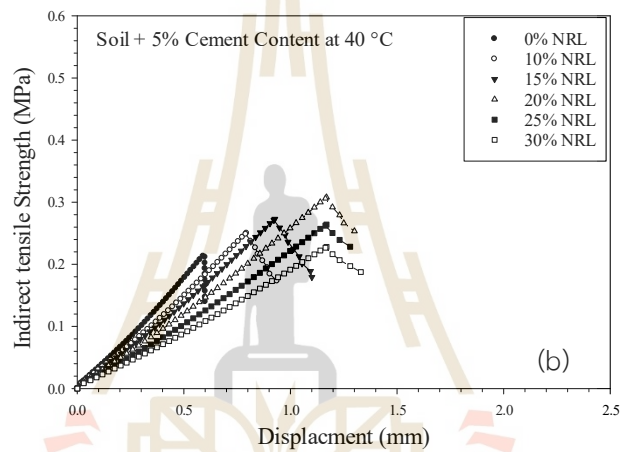
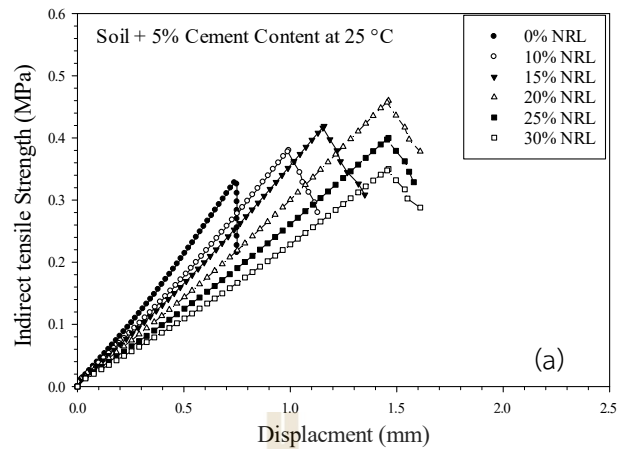
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์กับอัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่าง ที่ปริมาณซีเมนต์ที่ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9

เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์กับอัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่าง ที่ปริมาณซีเมนต์ที่ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 กับมาตรฐานชั้นพื้นทางดินซีเมนต์กรมทางหลวง (ทล.ท) 204-2556) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 สามารถสรุปได้ว่า พบว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ไม่มีการปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่ปริมาณซีเมนต์ที่ ร้อยละ 5, 7 และ 9 ผ่านข้อกำหนดกำลังอัดแกนเดียวตามมาตรฐานชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง เมื่อมีการปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มแล้ว พบว่าทุกอัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มผ่านข้อกำหนดกำลังอัดแกนเดียวตามมาตรฐานชั้นพื้นทางดินซีเมนต์กรมทางหลวง ซึ่งตามมาตรฐานกำหนดความต้องการขั้นต่ำไว้ที่ 1.724 เมกปาสคัล

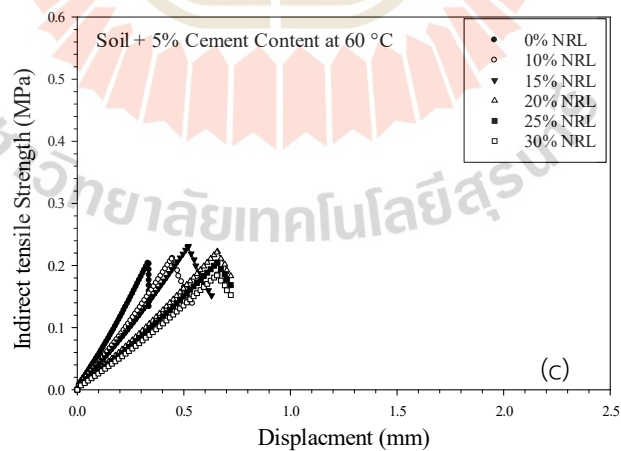
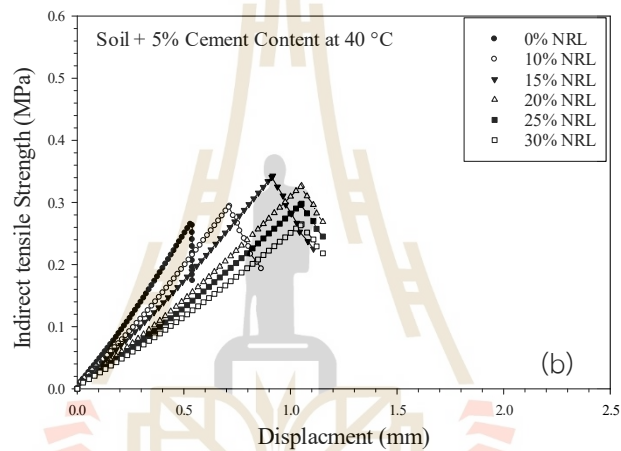
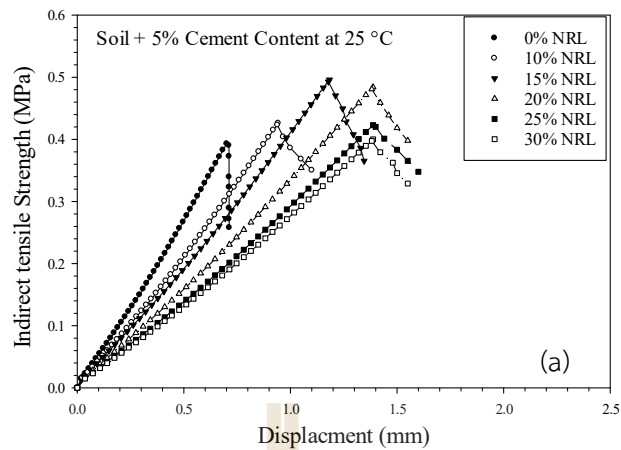
4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส

กำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์ ที่อัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกันและปริมาณซีเมนต์ที่ร้อยละ 3, 5, 7, และ 9 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.6, 4.7, 4.8 และ 4.9 ซึ่งสังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิทดสอบ 25 องศาเซลเซียส ความเป็นพลาสติกของดินส่งผลต่อกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์ที่คล้ายกับกำลังอัดแกนเดียว ดินซีเมนต์ที่ไม่มีการปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมเพิ่มขึ้นตามร้อยละซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น พบว่าที่ร้อยละ 3, 5,

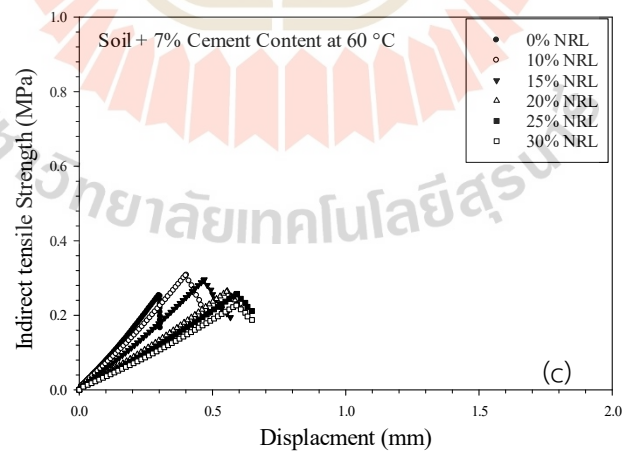
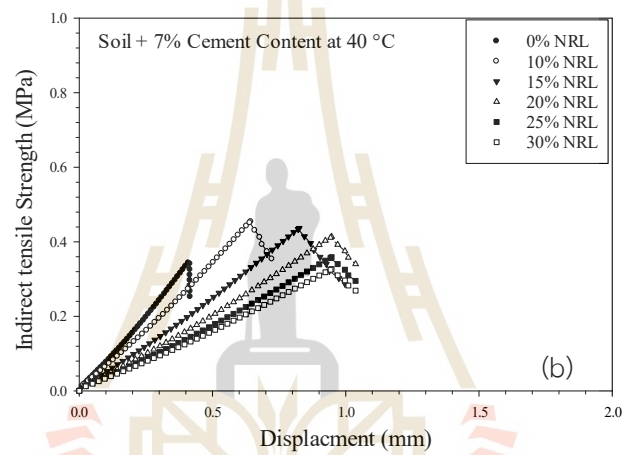
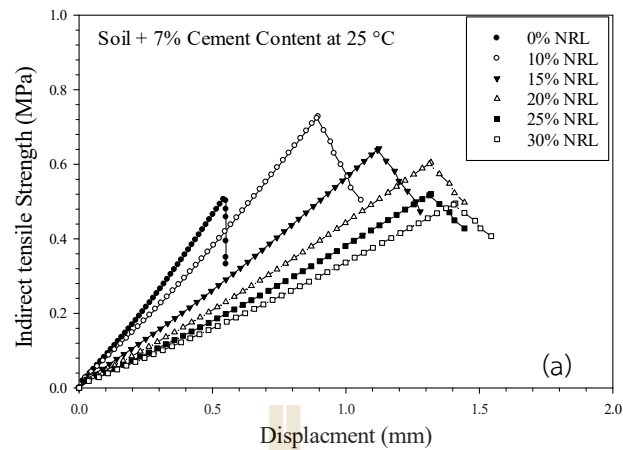
7, และ 9 ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่ คือ 0.33, 0.39 ,0.51 และ 0.65 ตามลำดับ เมื่อมีการปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม พบว่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มได้รับอิทธิพลจากอัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มเป็นหลัก กำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มจนถึงค่าสูงสุดที่การแทนที่น้ำยางพาราฯที่เหมาะสม เมื่อเพิ่มน้ำยางฯมากกว่าอัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราฯที่เหมาะสมแล้ว ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์จะลดลง ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3 คือ 0.38, 0.42, 0.45, 0.46, 0.40 และ 0.35 เมกะปาสคาล สำหรับอัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มจากร้อยละ 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังดึงทางอ้อมสูงสุดของดินซีเมนต์ร้อยละ 3 คือการแทนที่น้ำยางร้อยละ 20 เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ พบว่าทำให้กำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มลดลง กำลังรับแรงดึงทางอ้อมสูงสุดของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จะลดลงร้อยละ 33.04, 30.85, 37.61 และ 34.63 ที่ปริมาณซีเมนต์ ร้อยละ 3, 5, 7, และ 9 ตามลำดับ และลดลงร้อยละ 54.13, 53.43, 57.70 และ 54.44 สำหรับ สำหรับที่ 60 องศาเซลเซียส สำหรับดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราฯ เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้นผลทดสอบมีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลกำลังอัดแกนเดียวนั้นคือที่ซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7, และ 9 อัตราส่วนน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่เหมาะสมซึ่งให้กำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์สูงสุดคือร้อยละ 20, 15, 10 และ 10 ตามลำดับและเมื่ออุณหภูมิของการทดสอบเพิ่มมากขึ้น กำลังดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์ผสมน้ำยางฯจะมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามการแทนที่น้ำยางร้อยละ 20, 15, 10 และ 10 สำหรับซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7, และ 9 ตามลำดับ ยังส่งผลให้กำลังดึงทางอ้อมมีค่าสูงสุด ซึ่งผลทดสอบมีลักษณะเช่นเดียวกันสำหรับการทดสอบอุณหภูมิทั้งหมด



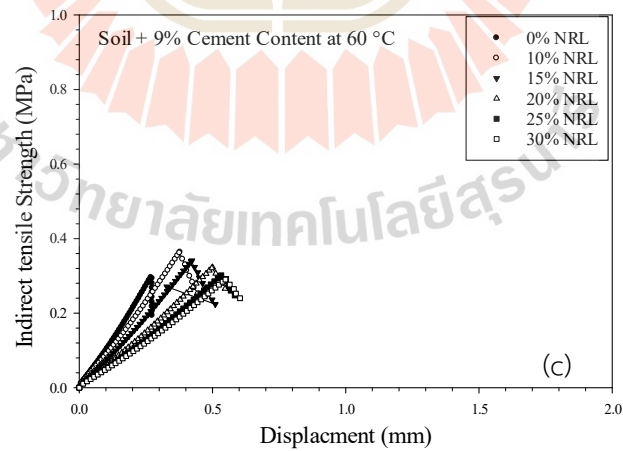
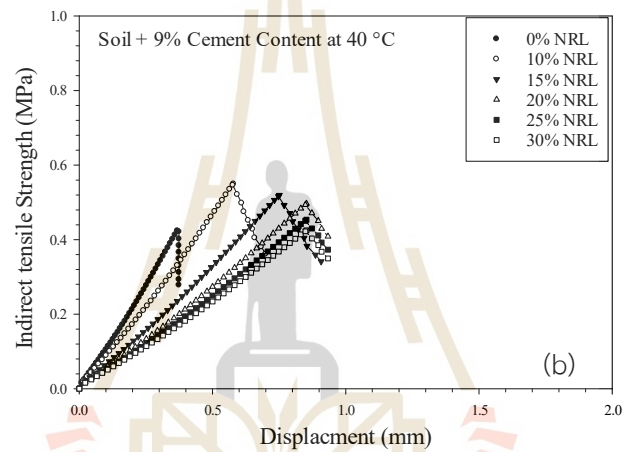
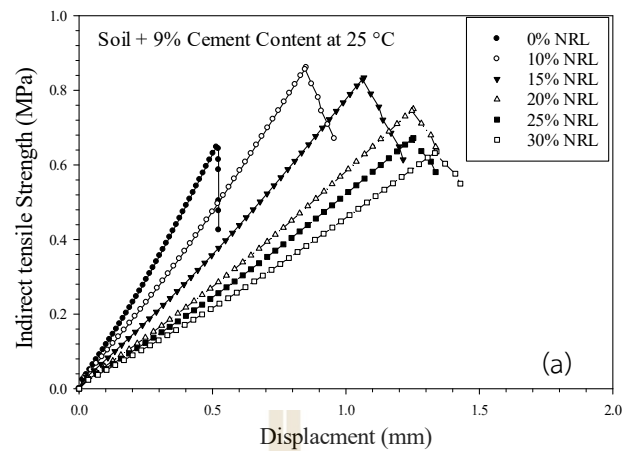
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์กับค่าการยุบตัวของดินซีเมนต์ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ (a) 25, (b) 40 และ (c) 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์กับค่าการยุบตัวของดินซีเมนต์ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิ (a) 25, (b) 40 และ (c) 60 องศาเซลเซียส



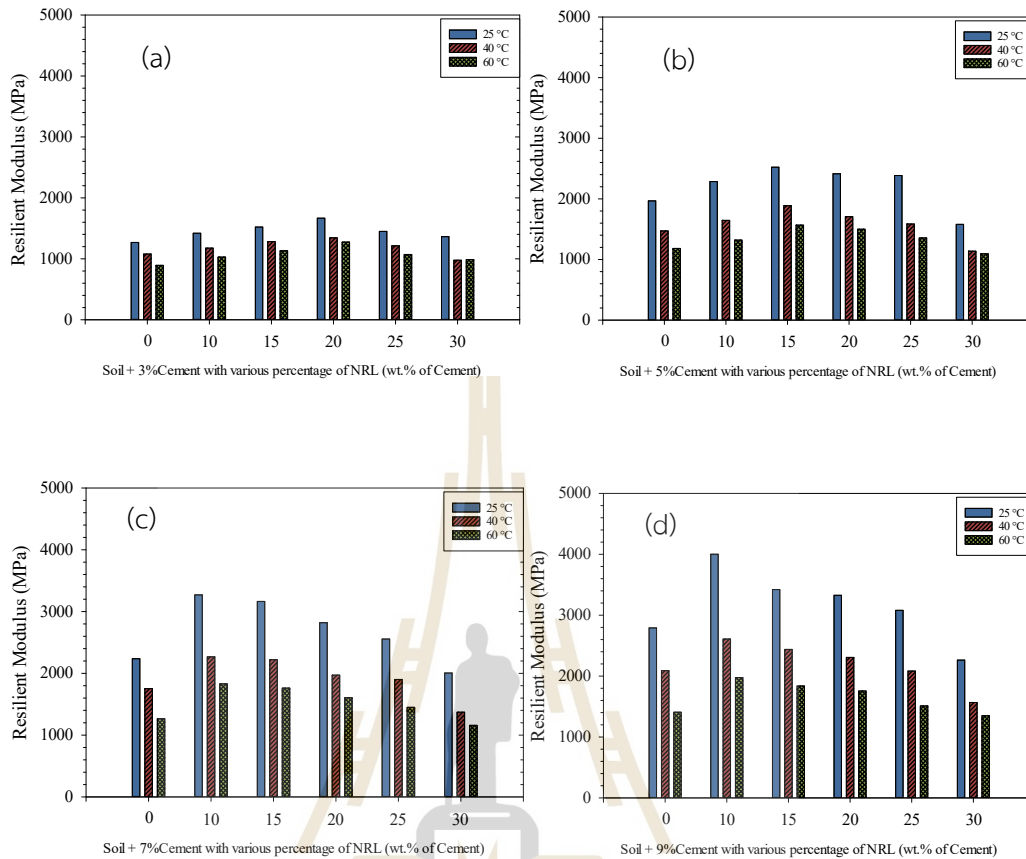
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์กับค่าการยุบตัวของดินซีเมนต์ร้อยละ 7 ที่อัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ (a) 25, (b) 40 และ (c) 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์กับค่าการยุบตัวของดินซีเมนต์ร้อยละ 9 ที่อัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ (a) 25, (b) 40 และ (c) 60 องศาเซลเซียส

4.5 ผลการทดสอบโมดูลัสการคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสการคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์กับอัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่ต่างกันและปริมาณซีเมนต์ที่ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 ที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสการคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมจะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย และเมื่อมีการปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม ค่าโมดูลัสการคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมจะเพิ่มขึ้นตามการแทนที่น้ำยางพาราที่เพิ่มขึ้นถึงจุดที่เหมาะสม เมื่อเพิ่มน้ำยางพารามากกว่าจุดที่เหมาะสมแล้ว ค่าโมดูลัสการคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมจะมีค่าลดลง คล้ายคลึงกันกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม อย่างไรก็ตามค่าโมดูลัสการคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมจะลดลงเมื่อทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น ค่าโมดูลัสการคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมสูงสุดของน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม ที่อุณหภูมิทดสอบ 25 องศาเซลเซียสคือ 1666, 2524, 3271, และ 4001 เมกะปาสคาล ที่ปริมาณซีเมนต์ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ค่าโมดูลัสการคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมสูงสุดจะลดลงมีค่าเท่ากับ 1343, 1888, 2267, 1666, และ 2610 เมกะปาสคาล ที่ปริมาณซีเมนต์ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ และ 1272, 1566, 1828 และ 1975 เมกะปาสคาล สำหรับ 60 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ ซึ่งที่อุณหภูมิทดสอบ 60 องศาเซลเซียส ค่าโมดูลัสการคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมลดลงถึงร้อยละ 23.60, 37.94, 44.10 และ 49.61 สำหรับปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ อัตราส่วนที่เหมาะสมของการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มซึ่งทำให้โมดูลัสการคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมสูงสุดคือร้อยละ 20, 15, 10 และ 10 สำหรับซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7, และ 9 ตามลำดับ ซึ่งผลทดสอบมีลักษณะเช่นเดียวกันสำหรับการทดสอบอุณหภูมิทั้งหมด นั่นคือที่จุดเหมาะสมค่าโมดูลัสการคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ธรรมดา อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของการทดสอบเพิ่มขึ้นค่าโมดูลัสการคืบตัวจะมีค่าลดลง



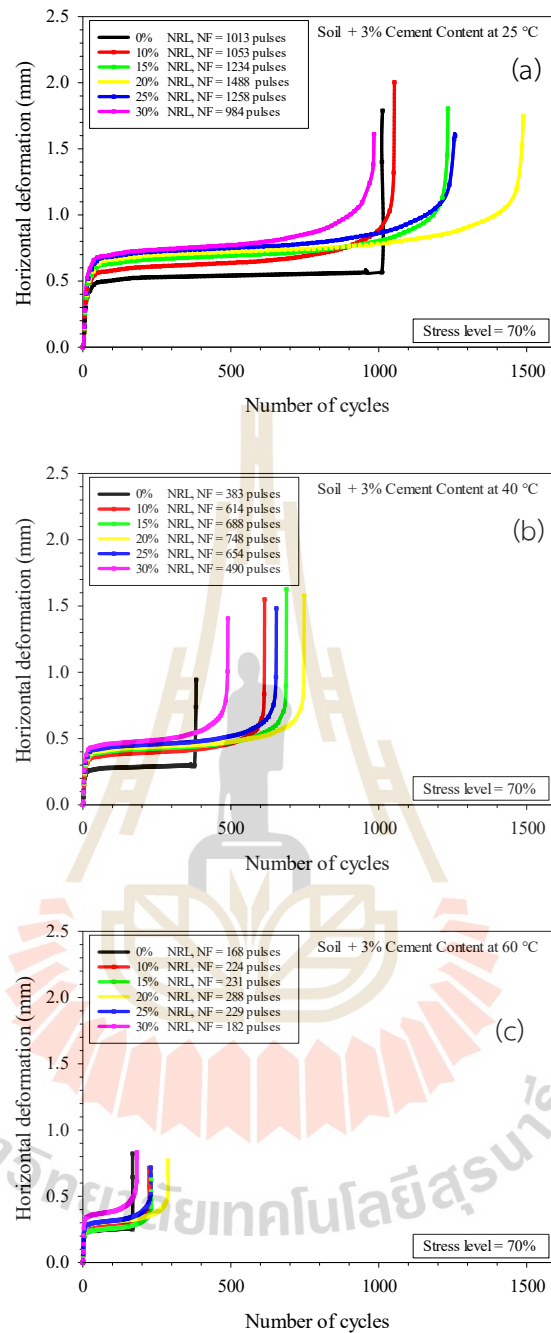
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสการคืนตัวเนื่องจากแรงดิ่งทางอ้อมของดินซีเมนต์กับที่อัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ (a) 3, (b) 5, (c) 7 และ (d) 9

4.6 ผลการทดสอบความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าจากแรงดิ่งทางอ้อมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส

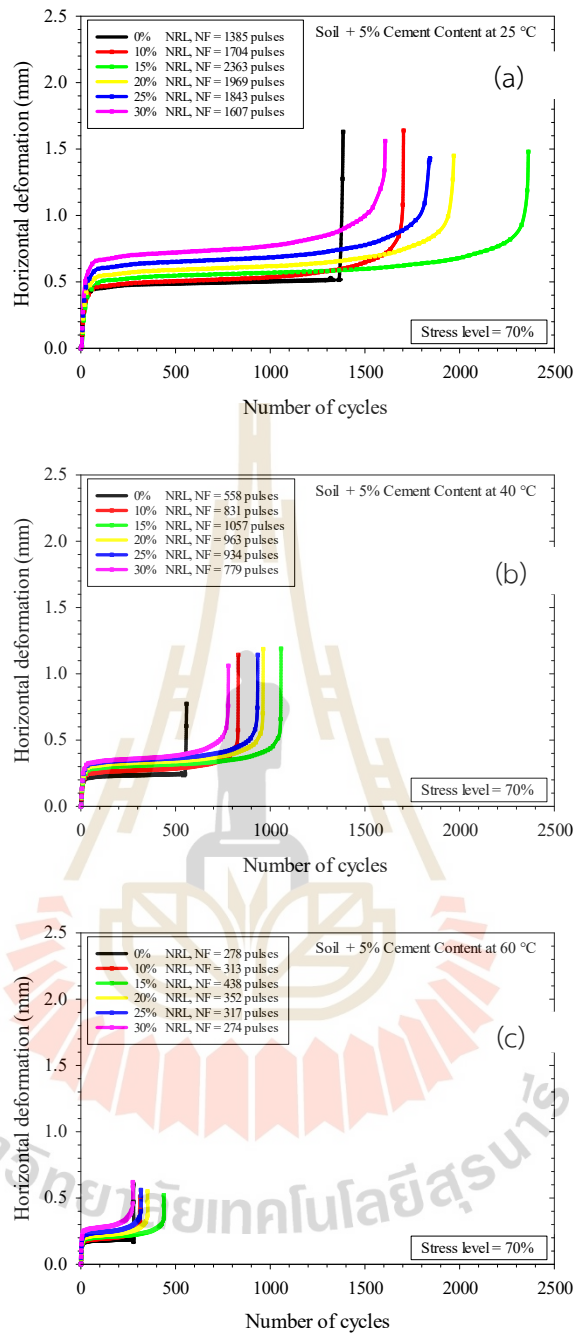
รูปที่ 4.11, 4.12, 4.13 และ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าจากแรงดิ่งทางอ้อมของดินซีเมนต์กับจำนวนรอบที่อัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน สำหรับดินผสมซีเมนต์ที่ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 ที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าจากแรงดิ่งทางอ้อมของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มนั้นขึ้นอยู่กับร้อยละซีเมนต์ที่ผสม อัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม และอุณหภูมิเป็นหลัก ตัวอย่างเช่น ค่าความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าจากแรงดิ่งทางอ้อมสูงสุดที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 ทดสอบที่ 25 องศา

เซลเซียส คือ 1488, 2363, 3168 และ 4247 รอบ ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าจากแรงดึงทางอ้อมจะมีค่าลดลง ที่อุณหภูมิทดสอบ 40 องศาเซลเซียส มีค่าลดลงร้อยละ 49.73, 55.25, 43.09 และ 32.40 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิทดสอบ 60 องศาเซลเซียสลดลงร้อยละ 80.65, 81.86, 71.80 และ 65.13 เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าก็จะมีค่าลดลง โดยจะมีค่าลดลงมากที่สุดที่ 60 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามการเพิ่มน้ำอย่างข่งผลให้ความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าจากแรงดึงทางอ้อมเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้ว่าจำนวนรอบวัฏจักรก่อนที่ตัวอย่างจะวิบัติจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเติมน้ำอย่าง ซึ่งอัตราส่วนเหมาะสมของการแทนที่น้ำอย่างพาราที่ให้ค่าความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าจากแรงดึงทางอ้อมสูงสุดคือ ร้อยละ 20, 15, 10 และ 10 สำหรับซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7, และ 9 ตามลำดับ ซึ่งค่าความต้านทานการแตกร้าวเพิ่มขึ้นร้อยละ 31.44, 28.38, 46.20 และ 19.18 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเติมน้ำอย่างพารา ช่วยลดความเสียหายของดินซีเมนต์ที่มีความคงทนต่อการรับแรงพลวัต ซึ่งช่วยให้ดินซีเมนต์มีอายุการใช้งานยาวนานกว่าดินซีเมนต์ธรรมดา

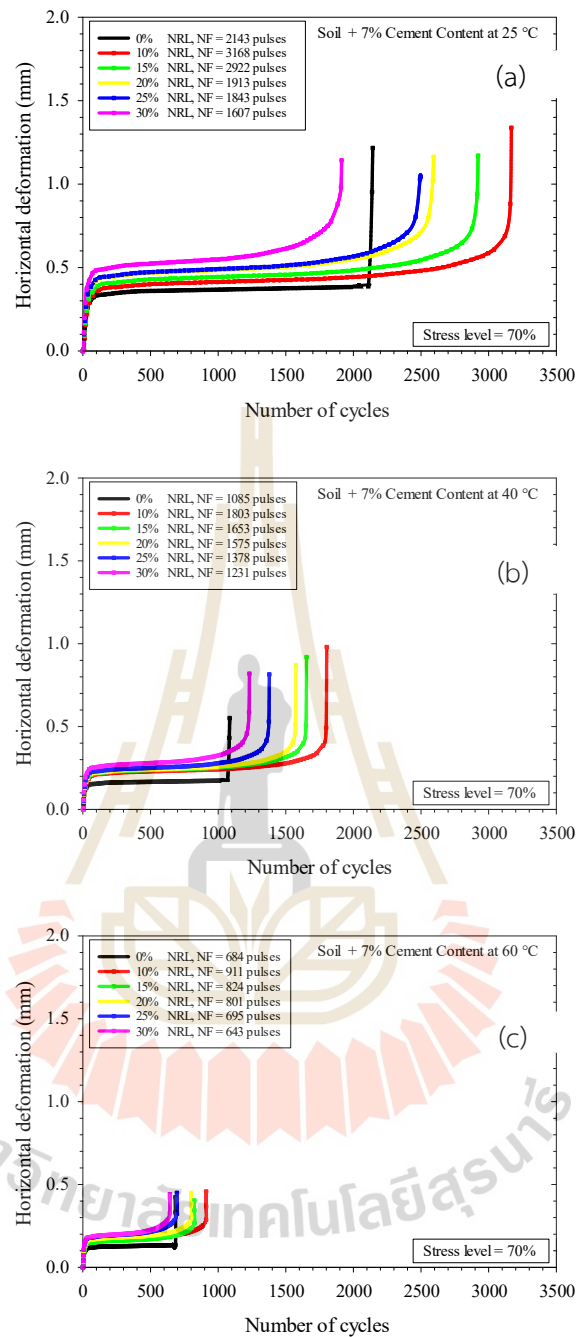
อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลกระทบต่อกำลังของวัสดุเป็นอย่างมาก งานวิจัยในอดีตแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินั้นส่งผลให้ดินซีเมนต์เกิดการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้น เมื่อดินซีเมนต์หดตัว จะก่อให้เกิดรอยร้าวระดับไมโครเมตร ซึ่งมีโอกาสจะที่รอยร้าวจะมีความกว้างเพิ่มขึ้นมากเรื่อยตามการสูญเสียความชื้น รอยร้าวนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้กำลังของวัสดุมีค่าลดลง ทำให้ดินซีเมนต์ที่ใช้ในงานในสภาวะอุณหภูมิสูงวิบัติได้ง่าย (George, K. P. 1968; George, K. P. 1974; Hernández García et al. 2020)



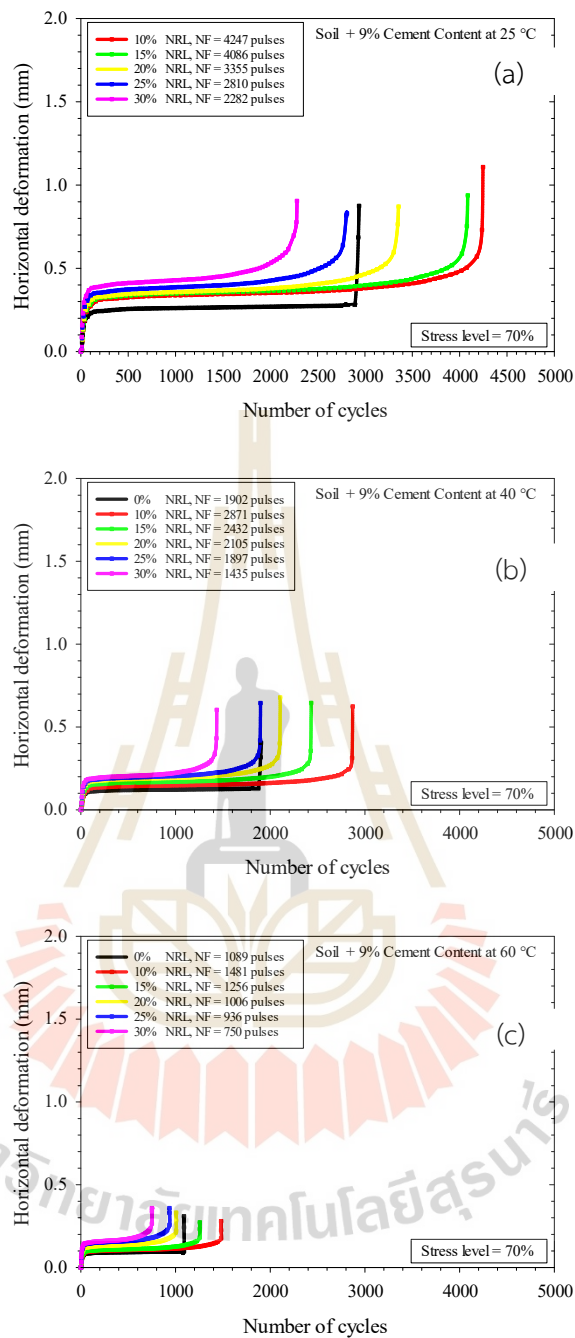
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าจากแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์ร้อยละ 3 กับจำนวนรอบที่อัตราส่วนการแทนที่น้ำยาพาราฟสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ (a) 25, (b) 40 และ (c) 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานการแตกหักโดยความล้าจากแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์ร้อยละ 5 กับจำนวนรอบที่อัตราส่วนการแทนที่น้ำยาพาราฟสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ (a) 25, (b) 40 และ (c) 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าจากแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์ร้อยละ 7 กับจำนวนรอบที่อัตราส่วนการแทนที่น้ำยาพาราฟสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ (a) 25, (b) 40 และ (c) 60 องศาเซลเซียส

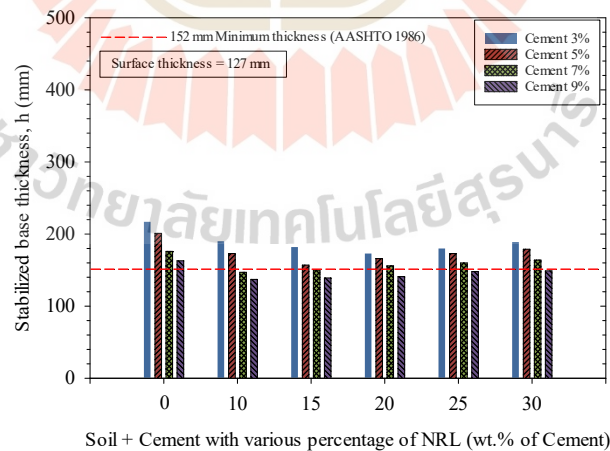
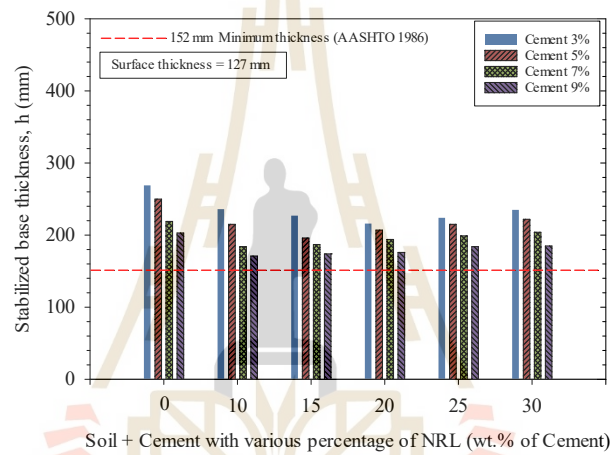
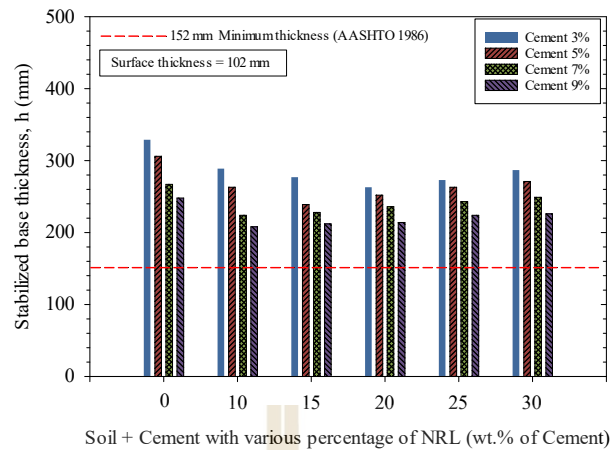


รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานการแตกหักด้วยความล้าจากแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์ร้อยละ 9 กับจำนวนรอบที่อัตราส่วนการแทนที่น้ำยาพาราฟสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ (a) 25, (b) 40 และ (c) 60 องศาเซลเซียส

4.7 การออกแบบและการประมาณค่าก่อสร้างถนนชั้นรองพื้นทางของถนนดินซีเมนต์กับถนนดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม

การออกแบบความหนาสำหรับดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม AASHTO (1993) ได้วิเคราะห์ข้อมูลการจราจรที่มีอยู่ของกรมทางหลวง ประเทศไทย (ทางหลวง กรุงเทพฯ-สระบุรี) ไว้เป็นกรณีศึกษา จากข้อมูลการจราจร ปริมาณการใช้รถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน (AADT) คือ 3079 ต่อวัน ระยะเวลาการออกแบบในที่นี้กำหนดไว้ 20 ปี โดยมีปัจจัยอัตราการเติบโต 5% สำหรับขั้นตอนการออกแบบ การวิเคราะห์ปริมาณการใช้งานจะขึ้นอยู่กับโหลดแบบเพลลาเดี่ยวที่คาดว่าจะสะสม 18 kip (80 kN) EASL ที่สะสมจึงเป็น 2.81×10^6 ความน่าเชื่อถือ (R) ถือเป็น 90% โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S_0) ที่ 0.45 ดัชนีความสามารถในการให้บริการเริ่มต้นและเทอร์มินัลถูกกำหนดเป็น 4.5 และ 2.5 ตามลำดับ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงในความสามารถในการให้บริการ (ΔPSI) คือ 2.0 หมายเลขโครงสร้าง (SN) เป็นฟังก์ชันที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ชั้น (a) ค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำ (m) เพื่อกำหนดความหนาของชั้น (h) ตามคำแนะนำของ AASHTO (1993) โมดูลัสยืดหยุ่นของเส้นทางพื้นผิวคอนกรีตแอสฟัลต์สามารถประมาณได้เป็น 3102.64 MPa ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ชั้นของพื้นผิวแอสฟัลต์คอนกรีต (a_1) สามารถประมาณได้เท่ากับ 0.44 สมมติว่าความหนาต่ำสุดของพื้นผิวแอสฟัลต์คอนกรีต (h_1) แปรผันจากช่วง 102, 127 และ 152 มม. ดังนั้น จำนวนโครงสร้างที่จำเป็นสำหรับชั้นผิว (SN_1) สามารถคำนวณได้เท่ากับ 1.76 2.20 และ 2.64 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาชั้นพื้นทางกับอัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่าง ที่ปริมาณซีเมนต์ที่ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 พบว่าความหนาชั้นพื้นทางมีค่าลดลงตามปริมาณน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่เพิ่มขึ้นจุดถึงจุดที่เหมาะสมของน้ำยางพาราที่ร้อยละซีเมนต์นั้น จากนั้นค่าความหนาชั้นพื้นทางจะเพิ่มขึ้น ความหนาผิวทาง 102 มิลลิเมตร ที่จุดเหมาะสมมีค่าความหนา 263, 239, 224 และ 208 มิลลิเมตร สำหรับซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ ค่าความหนา 216, 196, 184 และ 171 มิลลิเมตร สำหรับความหนาผิวทาง 127 มิลลิเมตร ที่จุดเหมาะสมที่ซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ และค่าความหนา 173, 157, 147 และ 137 มิลลิเมตร สำหรับความหนาผิวทาง 157 มิลลิเมตร ที่จุดเหมาะสมที่ซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาชั้นพื้นทางกับอัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน ที่ปริมาณซีเมนต์ที่ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9

จากรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ของค่าวัสดุก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางกับอัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน ที่ปริมาณซีเมนต์ที่ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 พบว่าค่า

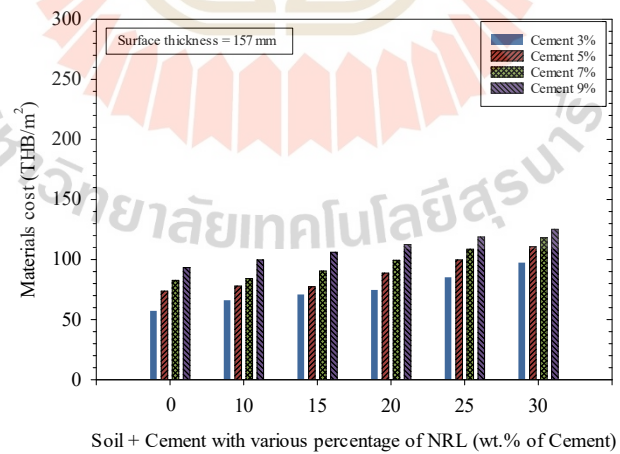
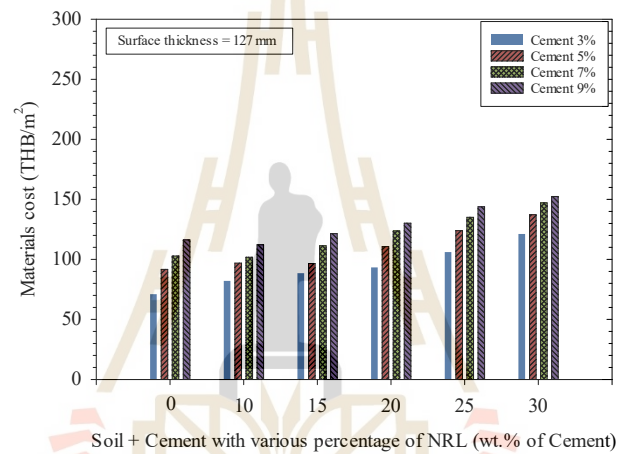
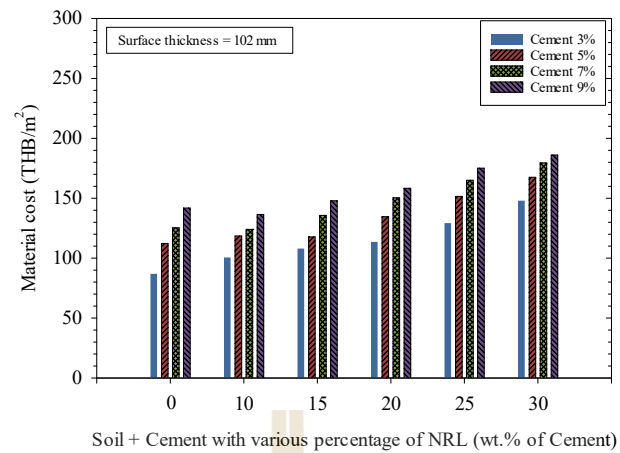
วัสดุก่อสร้างชั้นพื้นทางมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่เพิ่มขึ้น โดยจะเพิ่มมากที่สุดที่ปริมาณน้ำยางร้อยละ 30 ซึ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 70.32, 49.29, 43.22, และ 31.19 สำหรับชั้นที่ความหนาผิวทาง 102 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นร้อยละ 70.57, 49.70, 43.05, และ 31.19 สำหรับชั้นที่ความหนาผิวทาง 127 มิลลิเมตร และเพิ่มขึ้นร้อยละ 70.06, 50.12, 43.10, และ 34.24 สำหรับชั้นที่ความหนาผิวทาง 157 มิลลิเมตร สำหรับที่ซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ของค่าก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางทั้งหมดกับอัตราส่วนการแทนที่น้ำยางพาราผสมเพิ่มที่แตกต่าง ที่ปริมาณซีเมนต์ที่ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 พบว่าค่าก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางทั้งหมดมีค่าลดลงตามปริมาณน้ำยางพาราผสมเพิ่มที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่เหมาะสมของน้ำยางพาราที่ร้อยละซีเมนต์นั้น จากนั้นค่าก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางทั้งหมดจะเพิ่มขึ้น โดยสามารถแบ่งตามความหนาชั้นผิวทางดังนี้

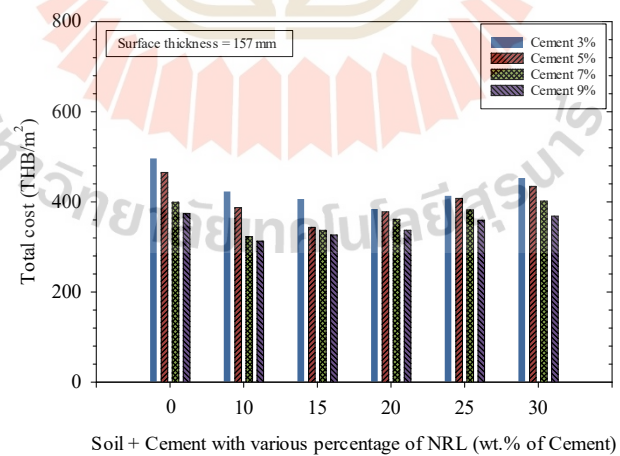
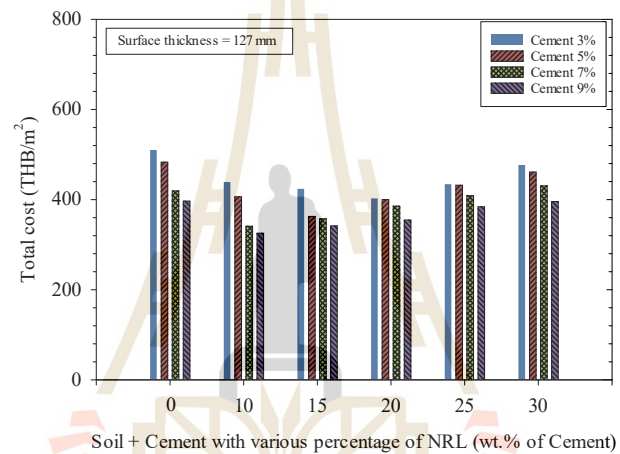
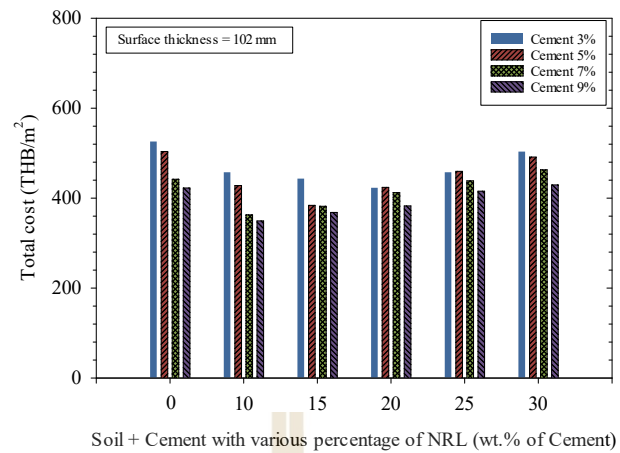
ที่ความหนาผิวทาง 102 มิลลิเมตร เมื่อไม่ได้ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา ค่าก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางจะเท่ากับ 526, 503, 442 และ 423 บาทต่อตารางเมตร สำหรับซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 แต่เมื่อปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา ที่จุดที่เหมาะสม จะมีค่าก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางลดลงเท่ากับ 423, 384, 363 และ 350 บาทต่อตารางเมตร สำหรับซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ ซึ่งลดลงร้อยละ 19.56, 23.77, 17.90 และ 17.30 เมื่อเทียบกับค่าก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา

ที่ความหนาผิวทาง 127 มิลลิเมตร เมื่อไม่ได้ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา ค่าก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางจะเท่ากับ 510, 483, 420 และ 396 บาทต่อตารางเมตร สำหรับซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 แต่เมื่อปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา ค่าก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางจะลดลงเท่ากับ 402, 363, 341 และ 325 บาทต่อตารางเมตร ตามลำดับหรือลดลงร้อยละ 23.42, 27.98, 22.91 และ 23.04 สำหรับจุดเหมาะสมการแทนที่น้ำยางพาราที่ร้อยละ 20, 15, 10 และ 10 ที่ซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ

ที่ความหนาผิวทาง 157 มิลลิเมตร เมื่อไม่ได้ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา ค่าก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางจะเท่ากับ 497, 466, 399 และ 374 บาทต่อตารางเมตร สำหรับซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 แต่เมื่อปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา ด้วยอัตราการแทนที่ที่เหมาะสมค่าก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางจะลดลงเท่ากับ 384, 344, 323 และ 313 บาทต่อตารางเมตร สำหรับที่จุดเหมาะสมการแทนที่น้ำยางพาราที่ซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 ซึ่งลดลงร้อยละ 26.95, 31.79, 26.92 และ 25.99



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ของค่าวัสดุก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางกับอัตราส่วนการแทนที่น้ำ ยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน ที่ปริมาณซีเมนต์ที่ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ของค่าก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางทั้งหมดกับอัตราส่วนการแทนที่น้ำ
 ยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน ที่ปริมาณซีเมนต์ที่ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 และศึกษากำลังรับแรงดึงทางอ้อม โมดูลัสการคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม และความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าจากแรงดึงทางอ้อมของดินซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส สามารถสรุปการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 สมบัติด้านกำลังของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม

สมบัติการรับกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มสูงกว่าตัวอย่างปรับปรุงด้วยซีเมนต์เพียงอย่างเดียว สำหรับทุกอัตราส่วนแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มทั้งหมด เนื่องจากการพัฒนาความแข็งแรงเกิดจากการผสมระหว่างไฮเดรตของซีเมนต์และการเกิดฟิล์มน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มซึ่งทำหน้าที่เป็นการเสริมแรง ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่เหมาะสม ซึ่งเท่ากับร้อยละ 20, 15, 10 และ 10 สำหรับซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7, และ 9 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการแทนที่น้ำยางมากกว่าจุดที่เหมาะสมส่งผลให้ฟิล์มน้ำยางพาราเพิ่มความหนาเพิ่มมากขึ้นและไปชะลอปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ทำให้กระบวนการแข็งตัวที่เกิดจากซีเมนต์ถูกขัดขวาง ส่งผลให้กำลังอัดแกนเดียวลดลง

สมบัติกำลังรับแรงดึงทางอ้อม โมดูลัสการคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม ความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าจากแรงดึงทางอ้อม ของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียสนั้นมีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด พบว่าที่อุณหภูมิทดสอบที่ 25 องศาเซลเซียส อัตราส่วนแทนที่น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดกำลังรับแรงดึงทางอ้อม โมดูลัสการคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม ความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าจากแรงดึงทางอ้อมสูงสุดคือร้อยละ 20, 15, 10 และ 10 สำหรับซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7, และ 9 ตามลำดับ แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้กำลังรับแรงดึงทางอ้อม โมดูลัสการคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม ความต้านทานการแตกร้าวโดยความล้าจากแรงดึงทางอ้อม ลดลงและลดลงมากที่สุดที่อุณหภูมิทดสอบ 60 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ดินซีเมนต์เกิดการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้น เมื่อดินซีเมนต์หดตัวมากเกินไปสิ่งที่ตามมาจะก่อให้เกิดรอยร้าวในเมทริกซ์ดินซีเมนต์ รอยร้าวนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้สมบัติต้านกำลังของวัสดุมีค่าลดลง ทำให้ดินซีเมนต์ที่ใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูงวิบัติได้ง่าย อย่างไรก็ตามการแทนที่น้ำยางพาราฯสามารถปรับปรุงให้ดินซีเมนต์มีความคงทนต่ออุณหภูมิและแรงพลวัตได้อย่างดี โดยขึ้นอยู่กับปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ สำหรับงานวิจัยนี้อัตราส่วนแทนที่น้ำยางพาราฯที่เหมาะสมสำหรับดินซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7, และ 9 ที่ทำให้สมบัติทางวิศวกรรมดีที่สุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 20 15, 10 และ 10 ตามลำดับ

5.1.2 การเปรียบเทียบค่าก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางของถนนดินซีเมนต์กับถนนดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม

พบว่าค่าก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่มมีค่าลดลงและลดลงมากที่สุดเมื่อการแทนที่น้ำยางพาราฯถึงจุดที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดค่าโมดูลัสการคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมสูงสุด นั่นคือ ที่การแทนที่น้ำยางพาราฯร้อยละ 20 15, 10 และ 10 สำหรับดินซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ ค่าก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางจะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นพื้นทาง เมื่อค่าโมดูลัสเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ความหนาของชั้นพื้นทางลดลง ซึ่งลดลงมากสุดในกรณีที่มีความหนาชั้นผิวทางเท่ากับ 157 มิลลิเมตร ซึ่งลดลงร้อยละ 26.95, 31.79, 26.92 และ 25.99 สำหรับที่จุดเหมาะสมที่ซีเมนต์ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 เปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่มีการปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม



บรรณานุกรม

Baghini, M. S., 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.

Baghini, M. S., Ismail, A., Naseralavi, 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.

Broms, B. B., and Boman, P. (1975). Lime stabilized column. Proc. 5th Asian Regional conf. Indian Institute of science. Bangalore. India. 1. pp.227-234.

Cireo, L. T., Davidson, D. T., and David, H. T. (1962). Strength of Soil-Cement Mixture. Iowa State University conference 41st Annual Section of Highway Research Board. National Research Council. Washington D.C., U.S.A.

Davis, R. E., Carlson, R. W., Kelly, J. W. and Davis, H. E. (1937, May). Properties of cements and concretes containing fly ash. In *Journal Proceedings*, 33(5), 577-612.

Delage, P., and Lefebvre, G. (1984). Study on the structure of sensitive Champlin clay and of its evolution during consolidation. *Canadian Geotechnical Journal*, 21, 21-35.

Estabragh, A. R., Bordbar, A. T., and Javadi, A. A. (2011). Mechanical behavior of a clay soil reinforced with nylon fibers. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(5), 899.

George, K. P. (1968). Shrinkage characteristics of soil-cement mixtures. *Highway Research Record*, 255, 42-58.

George, K. P. (1974). Cracking in soil cement. In *Australian Road Research Board (ARRB) Conference*, 7th, 1974, Adelaide (Vol. 7, No. 7).

Hernández García, L. C., & Lizarazo Salamanca, N. F. (2020). Resilient Module Soil-Cement Prediction based on Setting Temperature. *Ingeniería e Investigación*, 40(2),7-13

Hogentogler, C.A. (1938). *Engineering properties of the Soils*. Mc Graw Hill Book, New York. USA.

Horpibulsuk, S., Katkan, W., Sirilerdwattana, W., and Rachan, R. (2006). Strength development in cement stabilized low plasticity and coarse grained soils : Laboratory and field study. *Soils and Foundations*, 46(3), 351-366.

Horpibulsuk, S., and Raksachon, Y. (2008). Effect of cement content on strength and microstructure of cement stabilized clay. *Research and Development Journal of The Engineering Institute of Thailand*.

Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Raksachon, Y. (2009). Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay. *Soils and Foundations*, 49(1).

Jamsawang, P., Voottipruex, P., & Horpibulsuk, S. (2015). Flexural strength characteristics of compacted cement-polypropylene fiber sand. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(9), 04014243.

Kamon, M. (1979). *Study on Engineering Properties of Very Soft Clay and Its Stabilization*, Doctoral dissertation, Kyoto University, Kyoto, Japan (in Japanese).

Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y., and Honjo, Y. (1981). Deep mixing method using cement hardening agent, *Proc. of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Stockholm. pp.721-724.

Metcalf, J.B. (1977). *Principle and application of cement and lime stabilization*. Australian Road Research Board. 20 pp.

Michell, J.K. (1982). *Soil improvement state of the art report*. Proc. X ICSMFE (Rotterdam).

Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., and Aldava, M. (2017). Shear strength of a fibre-reinforced clay at large shear displacement when subjected to different stress histories. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(5), 422-429.

Mitchell, J.K., and Jack, E.K. (1966). *The fabric of soil-cement and its formation*. *Clay and Clay Minerals*, 26, 279-305.

Miura, K. I. N. Y. A., Miura, S., and Toki, S. (1986). Deformation behavior of anisotropic dense sand under principal stress axes rotation. *Soils and Foundations*, 26(1), 36-52.

Onyejekwe, S., and Ghataora, G. S. (2014). Effect of fiber inclusions on flexural strength of soils treated with nontraditional additives. *Journal of materials in civil engineering*, 26(8), 04014039.

Rhee, Y.H. (1982). Soil Stabilization with lime and Fly Ash, Master of Engineering Thesis, Asian Institute Technology.

Rezaeimalek, S., Nasouri, A., Huang, J., Bin-Shafique, S., and Gilazghi, S. T. (2017). Comparison of short-term and long-term performances for polymer-stabilized sand and clay. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English edition)*, 4(2), 145-155.

Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading) ASTM C1609

Standard Test Method for Indirect Tensile Strength of Bituminous Mixtures ASTM D6931

Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine ASTM C131

Suzuki, M. (1982). *Group theory* (Vol. 247). Springer.

Terashi, M., Tanaka, H., and Okumura, T. (1997). Engineering properties of lime treated marine soils and DMM, Proc. 6th Asian Reg. Conf. SMFE. 1. pp.191-194.

Tingle, J. S., and Santoni, R. L. (2003). Stabilization of clay soils with nontraditional additives. *Transportation Research Record*, 1819(1), 72-84.

Tingle, J. S., Newman, J. K., Larson, S. L., Weiss, C. A., & Rushing, J. F. (2007). Stabilization mechanisms of nontraditional additives. *Transportation Research Record*, 1989(1), 59-67.

United States. Air Force, and United States. ESSA. (1966). *US Standard Atmosphere Supplements*, 1966. US Government Printing Office.

Wilmot, T. D. (1995). Selection of additive for stabilization and recycling of road pavement. *Pavement Rehabilitation Workshop*. 24-25 August 1995. Queensland. pp. 1-14

Yaowarat, T., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Maghool, F., Mirzababaei, M., Rashid, A. S. A., & Chinkulkijniwat, A. (2020). Cement stabilisation of recycled concrete aggregate modified with polyvinyl alcohol. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-9.

กรมทางหลวง. (2533). มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base). มาตรฐานที่ ทล.-ม.204/2556.

ไพวรรณ เขียวอ่อน. (2556). กำลังรับแรงอัดและกำลังแรงดัดของตัวอย่างวัสดุพื้นทางเดิม ปรับคุณภาพด้วยซีเมนต์ และสารผสมเพิ่ม, วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท สาขาวิชาการบริหารงาน ก่อสร้างและสาธารณูปโภค สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท (2556). งานพื้นทางดินซีเมนต์ (soil cement base) มาตรฐานที่ มทช.(ท) 244-2556

มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท (2556). วิธีการทดสอบความแน่น แบบสูงกว่ามาตรฐาน (MODIFIED COMPACTION TEST) มาตรฐานที่ มทช. 501.2-2545

มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท (2545). วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าแรงอัดแกนเดียว (UNCONFINED COMPRESSION TEST) มาตรฐานที่ มทช.(ท) 303-2545

มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท (2545). วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ (SIEVE ANALYSIS) มาตรฐานที่ มทช.(ท) 501.8-2545

มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท (2545). วิธีการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความ ดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวมหยาบ (COARSE AGGREGATE) มาตรฐานที่ มทช.(ท) 101.4-2545

มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท (2545). วิธีการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความ ดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวมละเอียด (FINE AGGREGATE) มาตรฐานที่ มทช.(ท) 101.5-2545

มาตรฐานกรมทางหลวง (2556). มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil cement Base Material) มาตรฐานที่ ทล.-ม 204/2556

มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท (2545). วิธีการทดสอบหาส่วนคละ (Sieve Analysis) ของ วัสดุมวลรวม (Aggregate) มาตรฐานที่ มทช.(ท) 101.1-2545

สมชัย กกก้านแหง. (2535). การนำซีเมนต์ลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุก่อสร้างงานดิน. การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2535 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชาูปถัมภ์ 26-29 พฤศจิกายน. 2535

อนิรุทธ์ ชงไชย และ สุเทพ นิมนวล. (2530). การใช้ประโยชน์ซีเมนต์ลอยในการเป็นวัสดุสร้าง ทางหลวง. รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.



ภาคผนวก ก

การเข้าร่วมประชุมวิชาการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



KKU-IENC 2021

Certificate of Participation
This certifies that

Krairerk Atiamsri

has presented the paper

Cyclic performance improvement of cement stabilized lateritic soil using natural rubber latex

which was peer reviewed

The 7th KKU International Engineering Conference 2021

held on May 12-14, 2021

Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Ratchaphon Suntivarakorn,
Dean of the Faculty of Engineering, Khon Kaen University
The General Chair of KKU-IENC2021



**KKU International Engineering Conference 2021 (KKU-IENC2021)
May 12-14, 2021 - Khon Kaen, Thailand**

**Cyclic performance improvement of cement stabilized lateritic soil
using natural rubber latex**

Krairerk Aiamsri⁽¹⁾; Suksun Horpibulsuk^{(2)*}; and Teerasak Yaowarat⁽³⁾

⁽¹⁾School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand. Email: M6201081@g.sut.ac.th

⁽²⁾Professor, School of Civil Engineering, and Director, Center of Excellence in Innovation for Sustainable Infrastructure Development, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand and Associate Fellow, Academy of Science, The Royal Society of Thailand, Bangkok 10300, Thailand. Email: suksun@g.sut.ac.th

⁽³⁾Post-Doctoral Researcher, Center of Excellence in Innovation for Sustainable Infrastructure Development, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
Email: teerasakyaowarat@gmail.com

*Corresponding author. Tel.: 089-767-5759; Email address: suksun@g.sut.ac.th

Abstract

This paper reports the influence of Natural Rubber Latex (NRL) on properties of cement stabilized lateritic soil. The effect of influence factors including NRL replacement ratio and temperatures on unconfined compressive strength (UCS), indirect tensile strength (ITS), indirect tensile resilient modulus (RM) and indirect tensile fatigue life (ITFL) were examined. Portland cement (Type I) was used at 5% by weight of dry soil and the NRL replacement ratios were varied at 10%, 15%, 20%, 25%, and 30% by weight of optimal water. The UCS, ITS, RM and ITFL increased with increasing the NRL replacement ratio up to the highest value at the optimum NRL replacement ratio, which is 20% at cement content of 5%, respectively. According to the local road authority, which requires $UCS > 1.75$ MPa for stabilized base course, the cement-NRL-stabilized lateritic soil with 15% to 20% NRL replacement ratio and 5% cement were found to have physical and strength properties, which comply with road authority requirements.

Keywords: Natural rubber latex, Unconfined compressive strength, Indirect tensile strength, Indirect tensile resilient modulus, Indirect tensile fatigue life

1. Introduction

Research on stabilizers for problematic soil in civil engineering construction activities is increasingly gaining popularity during the past few decades due to natural soils exhibit unfavorable physical and engineering properties, which are often not suitable for high volume road construction [1-3]. Among all these stabilizers, cement is widely used to improve the strength properties and the cement stabilized soil was successfully applied to real-world works as base/subbase materials [4, 5]. Although cement stabilization is a good option for road bases/subbases, cement-stabilized soil exhibits a brittle behaviour under compression and flexural loading. Therefore, the ductile behaviour of pavement materials need to be improved to prevent the sudden failure due to traffic loads. Moreover, there are some discussions that using cement in a pavement base/subbase structure may be considered as the source of shrinkage cracking and such cracks tend to propagate through the overlaying asphalt layer [6, 7].

In an attempt to improve the ductile behaviour of subbase/base materials, synthetic polymer additives, such as polyvinyl alcohol and styrene-butadiene copolymer latex, have been widely used for improving elastic property of cement-stabilized soil. The inclusion of polymers into cement-stabilized soil enhanced the interparticle bonding strength between soil interparticle, resulting in the increase in both compressive and flexural strengths, durability, and the ductility of cement-stabilized soil [8-10].

In addition to soil-stabilization by synthetic polymer, Natural rubber latex (NRL) from the *Hevea brasiliensis* tree which is a natural polymer and can be used as polymer additives for soil improvement. NRL has been researched and applied in concrete technology and mortar mixtures as an eco-friendly material [11, 12]. The introduction of NRL in cement concrete has shown enhancement in beneficial properties such as a reduction in water absorption and improvement in durability [13, 14]. The nano-composite of NRL can form a latex film, which causes the transformation of the cement matrix to be the latex cement comatrix by the infiltration of polymer film within the porous [11, 15]. The utilization of NRL additives into concrete and mortar therefore has a significant effect on the strength and toughness development [16].

NRL, as admixture, has been successfully employed to improve seepage resistance in soil [17]. Beneficial properties of NRL which supports soil stabilization are, miscibility with water before coagulation of latex, immiscibility after coagulation, elastomeric property, non-

**KKU International Engineering Conference 2021 (KKU-IENC2021)
May 12-14, 2021 - Khon Kaen, Thailand**

toxicity, compatibility with various soils and high melting point (180°C) [14, 17]. The previous research has proven that NRL improve the mechanical strength and cyclic wetting and drying compressive strength [1, 18]. However, the influence of NRL on the performance of laterite soil–cement is not explored on a cyclic performance versus temperature.

To the best of the authors' knowledge, there has been no research undertaken to date on the usage of NRL in pavement geotechnics to improve the durability of cement stabilized pavement base/subbase, which is the focus of this research. The effect of influence factors including NRL replacement ratio and temperature on the indirect tensile strength (ITS), indirect tensile resilient modulus (RM), and indirect tensile fatigue life (ITFL) were examined in this research study. The outcome of this research will result in the promotion of NRL utilization as a sustainable additive in cement stabilized pavement base/subbase courses in Thailand and other Southeast Asia countries.

2. Materials and methods

2.1 Materials

2.1.1 Soil Sample

The soil samples were a coarse-grained soil, collected from a borrow pit in Nakhon-Ratchasima Province, Thailand. The grain size distribution is illustrated in Fig. 1. According to unified classification system, this soil was classified as GW-GC. Basic and engineering properties of soil are summarized in Table 1 and were compared with the Standard for soil cement of base/subbase materials [DH-S204/2532 (Thailand Department of Highways 1996) and DH-S206/2532 (Thailand Department of Highways 1996)].

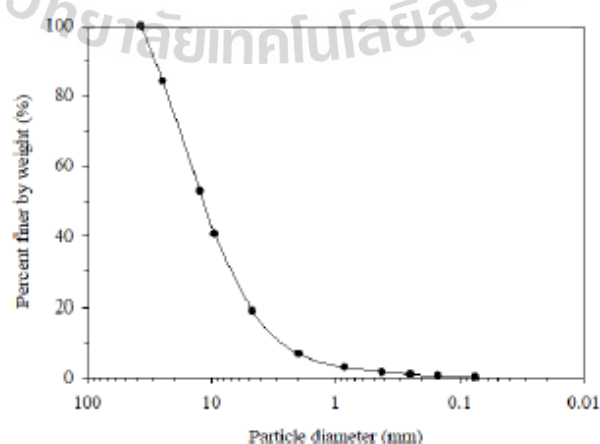


Figure 1 The grain size distribution of soil sample.

**KKU International Engineering Conference 2021 (KKU-IENC2021)
May 12-14, 2021 - Khon Kaen, Thailand**

Table 1 Basic and engineering properties of soil sample

Sample properties	Soil sample	Standard for soil Cement of subbase materials (DH-S206/2532)	Standard for soil Cement of base materials (DH-S204/2532)
		Values	
Largest particle size (mm)	25	≤50	≤50
Percent passing of Sieve No. 200 (%)	0.17	≤40	≤25
Los Angeles abrasion (%)	37.7	-	≤60
Liquid limit LL (%)	17.8	≤40	≤40
Plastic limit PL (%)	22.8	-	-
Plasticity index PI (%)	5	≤20	≤15
Specific gravity (Gs)	2.77	-	-
Maximum dry density (ton/m ³)	2.14	-	-
Optimum water content (%)	7.41	-	-

2.1.2 Cement

Ordinary Portland cement was selected as a cementing agent. The chemical compositions are summarized in Table 2. The initial and final setting times were 101 minutes and 188 minutes, respectively. The compressive strengths at 7 days and 28 days were 24.7 MPa and 32.6 MPa, respectively.

Table 2. Chemical compositions of cement

Materials	Composition (%)						
	SiO ₂	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	LOI
Cement	20.9	2.7	3.32	4.7	65.4	2.54	0.9

2.1.3 Natural Rubber Latex

The natural rubber latex, obtained from the Rubber Authority of Thailand, was used in this research. It contained sodium dodecyl sulphate (SDS) as a surfactant to remove protein. Moreover, zinc 2-mercaptobenzothiazole (ZMBT), zinc oxide, calcium carbonate, and sulphur substance were included to improve workability and desired properties of NRL. The compositions are illustrated in Table 3. The total solid contents were 33.06% by total weight, which included the dry rubber content of 30.79% by total weight of NRL. The studied NRL is classified as the low category, having DRC lower than 31%.

Table 3. Properties of NRL

Properties	Values
Sludge content (%wt)	2.46
Coagulum content (%wt)	0.024
Specific gravity (Gs)	0.96
pH	8

2.2 Experimental Procedures

2.2.1 Preparation and Testing Condition

The soil samples were sieved to remove coarser aggregates larger than 19 mm and air dried. Portland cement of 5% by weight of the dry soil was mixed with the soil samples. The soil-cement mixture was then mixed with liquid (NRL and water) at different NRL replacement ratios of 10%, 15%, 20%, and 30% by weight of water. The cement and dried soil were thoroughly mixed together for 10 minutes and then mixed with liquid at various NRL replacement ratios for another 10 minutes prior to being compacted under modified Proctor energy. Because the NRL is in liquid form, the NRL replacement is determined in terms of optimum water content, which is practically applied in real construction in Thailand.

2.2.2 Unconfined Compressive Strength

According to ASTM D1633 standard, at least 3 samples were conducted to ensure the reliability of the test result. The UCS tests on 28 days cured samples were conducted at a deformation rate of 1 mm/min, using a universal testing machine with an automatic data recorder.

2.2.3 Indirect Tensile Strength (ITS)

The ITS test is an effective method to evaluate the tensile strength of cement stabilized soil in accordance with ASTM D6931 for pavement engineering design. The samples were compacted in a metallic mold with dimensions of 101.60 mm diameter and 65.00 mm height by using a static compression machine to attain the target dry densities. The samples were then subjected the static vertical stress at the deformation rate of 1 mm/min using a universal testing machine with an automatic data recorder. The ultimate ITS was calculated in accordance with the elastic theoretical approach by the following equation.

**KKU International Engineering Conference 2021 (KKU-IENC2021)
May 12-14, 2021 - Khon Kaen, Thailand**

where P is the is a maximum load (N), t is the sample thickness (mm), and d is the sample diameter (mm)

2.2.4 Indirect tensile resilient modulus test (RM)

Indirect tensile resilient modulus test (ASTM D7369) was conducted on the NRL-cement stabilized soil samples. The dimensions of the samples were the same as those for the ITS samples. Since this test is non-destructive, the same samples were also used for indirect tensile fatigue life (ITFL) evaluations. Cyclic load pulses were applied at a frequency of 1 Hz. Stress levels were kept at 15% of the ITS. The horizontal displacements were measured by linear variable differential transducers (LVDTs). The samples were subjected to 200 load cycles. RM was calculated using the following equation:

$$RM = \frac{P(v+0.27)}{Hh} \quad (2)$$

where P is peak load, v is Poisson's ratio and was assumed to be 0.17 (Kleinert et al. 2017), H is height of specimen and h is horizontal displacement of specimen after application of load.

2.2.5 Indirect tensile fatigue life test (ITFL)

The ITFL characterizes the fatigue behavior of NRL-cement stabilized soil under controlled load test conditions. The displacement transducers were used to measure the vertical deformation. A cylindrical test sample was subject to repeated compressive loading across the vertical diametrical plane. Stress level imparted were at 70% of the ITS with cyclic load pulses at a frequency of 1 Hz. The ITFL of the NRL-cement stabilized soil is defined as the total number of load applications before fracture of the sample occurs (Sobhan and Das 2007).

3. Results

3.1 Unconfined Compressive Strength

Figure 2 illustrates the UCS versus NRL replacement ratio relationship at different cement contents for Soil A, Soil B, and Soil C. The solid line in Figure 2 represents the minimum UCS requirement for base and subbase cement-stabilized materials according to DH-S204/2532 and DH-S206/2532 standard, respectively. UCS increases with increasing the NRL replacement ratio up to the highest value at the optimum NRL replacement ratio. Beyond this optimum NRL replacement ratio, the UCS decreases. The UCS value is found are 1.79, 2.20, 2.31, 2.55, 1.91, and 1.73 MPa for NRL replacement ratios of 0, 10, 15, 20, 25 and 30%,

KKU International Engineering Conference 2021 (KKU-IENC2021)
May 12-14, 2021 - Khon Kaen, Thailand

respectively. The optimum NRL ratio providing the highest UCS is 20% for cement = 5%, respectively.

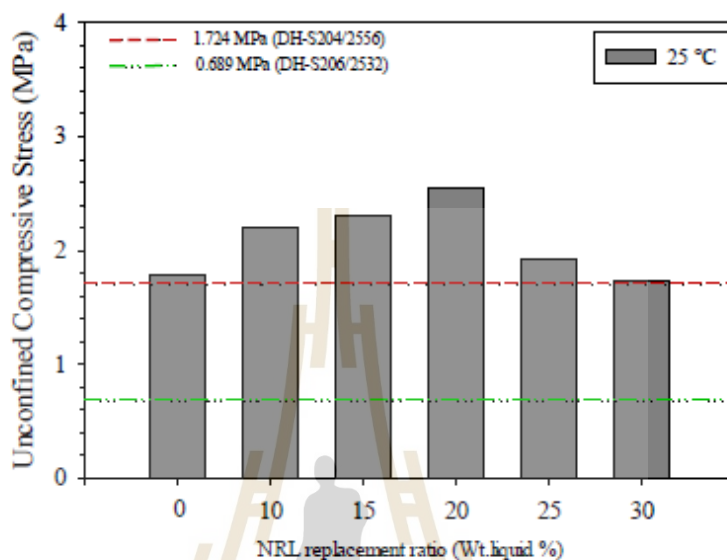


Figure 2 Unconfined compressive test results for different NRL replacement ratios

3.2 Indirect Tensile Strength

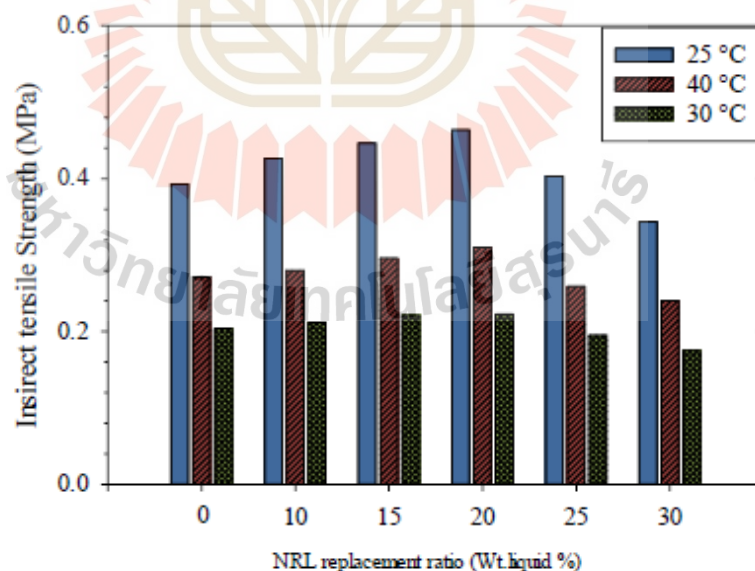


Figure 3 Indirect tensile strength test results for different NRL replacement ratios and temperature.

The ITS values for 5% cement stabilized soil at various NRL replacement ratios are illustrated in Figure 3. It is noted from Figures 3 that the soil plasticity affects the ITS

KKU International Engineering Conference 2021 (KKU-IENC2021)
May 12-14, 2021 - Khon Kaen, Thailand

similar to UCS. The ITS of NRL-cement stabilized soil is primarily influenced by the NRL replacement ratio. ITS increases with increasing the NRL replacement ratio up to the highest value at the optimum NRL replacement ratio. Beyond this optimum NRL replacement ratio, the ITS decreases. The ITS value at 25°C is found are 0.39, 0.42, 0.45, 0.46, 0.40, and 0.34 MPa, while the ITS value at 60°C are 0.20, 0.21, 0.22, 0.23, 0.19, and 0.17 MPa for NRL replacement ratios of 0, 10, 15, 20, 25 and 30%, respectively. The increase in temperature leads the ITS decreased, the ITS reduces 47% to 53% for all NRL replacement ratio when the temperature increase up to 60°C. However, the optimum NRL ratio providing the highest ITS is 20% for cement = 5%, respectively for all temperature tested.

3.3 Indirect Tensile Resilient Modulus

Figure 4 shows the average RM of NRL-cement stabilized soil at various NRL replacement ratio. The RM increases with increasing NRL replacement ratio, nevertheless, the RM reduces with the increased temperature tested. For example, the RM values of NRL-cement stabilized soil at 25°C are 1,965, 2,286, 2,386, 2,523, 2,414 and 1,579 MPa for NRL replacement ratios of 0, 10, 15, 20, 25 and 30%, respectively. While the temperature of 60°C, the RM reduces and is found are 1182, 1319, 1554, 1666, 1599 and 987 MPa for NRL replacement ratios of 0, 10, 15, 20, 25 and 30%, respectively, which is decrease about 35%-40%. The optimum NRL ratio providing the highest RM is 20% for cement = 5%, respectively for all temperature tested.

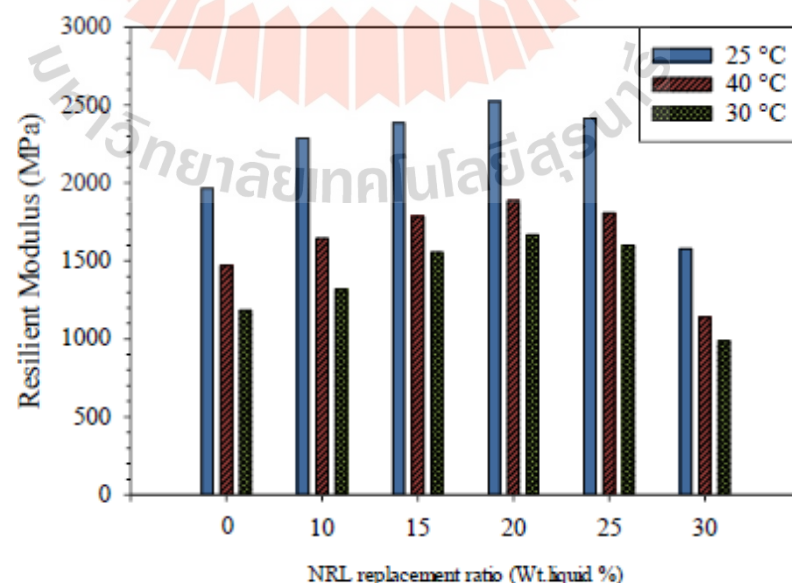


Figure 4 Indirect tensile resilient modulus for different NRL replacement ratios and temperature.

3.4 Indirect tensile fatigue life test

Figure 5 presents the ITFL at various NRL replacement ratios and temperature. The ITFL of the NRL-cement stabilized soil is primarily dependent upon the NRL replacement ratios and temperature content. For example, the ITFL values at 25°C are 1,385, 1,704, 1,969, 2,363, 1,843 and 1,607 cycles while the ITFL values at 60°C are 277, 312, 387, 451, 416 and 373 cycles for NRL replacement ratios of 0, 10, 15, 20, 25 and 30%, respectively. This indicate that the superior cyclic performance of NRL-cement stabilized soil will result in longer service life and lower maintenance cost than the cement stabilized soil.

4. Discussion

The improvement in UCS, ITS, RM and ITFL when increasing the NRL replacement ratio up to the highest value at the optimum NRL replacement ratio is due to the NRL films can infiltrate and reduce void space within the soil-cement matrixes and also enhance the interparticle forces [1]. The NRL film formation within the compacted matrix after the liquid substances evaporate away, and the films connected and entwined soil-cement particles [19, 20]. Therefore, the soil-cement cohesive matrix is improved by means of reinforcements from NRL films formation with the denser structures [19, 21] which leads to an increase the confinement force in compacted matrix, therefore, it improves in UCS, ITS, RM and ITFL. The addition of NRL to cement stabilized soil also leads to a significant increase in tensile strength, which significantly improve fatigue cracking resistance.

Beyond the optimum NRL ratio, the UCS, ITS, RM and ITFL decrease with the increased NRL replacement ratio. The excessive NRL content causes the loose microstructures, resulted from the decreased density [20, 22]. In addition, the excess NRL replacement induces the high amount of non-rubber substance such as protein and phospholipid, especially the deleterious composition of acid and bacteria [14], which retards the hydration process [1, 18-22] and causes the strength reduction.

KKU International Engineering Conference 2021 (KKU-IENC2021)
May 12-14, 2021 - Khon Kaen, Thailand

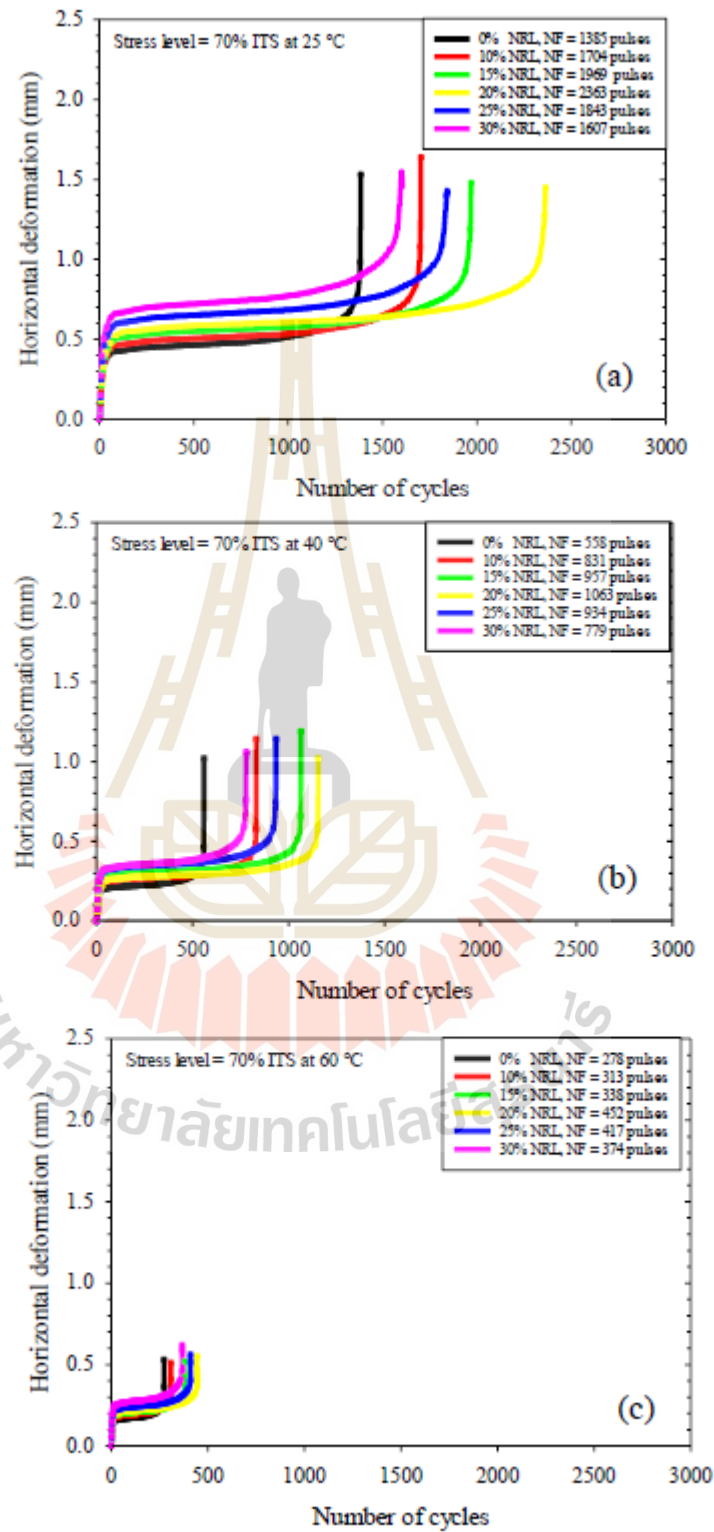


Figure 5 Indirect tensile fatigue life for different NRL replacement ratios at (a) 25°C, (b) 40°C, (c) 60°C

5. Conclusions

This research studied the influence of natural rubber latex (NRL) on the improvement of mechanical properties of cement stabilized soils for unpaved road applications. The indirect tensile strength, indirect tensile resilient modulus and indirect tensile fatigue tests on NRL-cement stabilized samples were carried out at various NRL replacement ratios. The conclusions can be drawn as follows:

1. The NRL-cement stabilized samples have higher UCS than the cement stabilized samples for all NRL replacement ratios tested. The strength development is due to the composite between cement hydration and the NRL film formation, which served to be the reinforcement. The highest UCS value is found at an optimum NRL replacement ratio, which is 20% for 5% cement, respectively.
2. The UCS, ITS, RM and ITFL are contributed from both cementitious products and NRL films, which improved cohesive matrix by means of reinforcements from NRL films formation. Though NRL films improves the soil cohesion, they retard the hydration. The UCS, ITS, RM and ITFL therefore increase with increasing the NRL replacement ratio up to the highest value at the optimum NRL replacement ratio
3. At the optimum NRL replacement ratio, the UCS, ITS, RM and ITFL were improved up to 42%, 18%, 28% and 70%, respectively when compared to the cement stabilized samples (without NRL) for the temperature tested at 25°C.
4. The increase in temperature causes the deterioration in ITS, RM and ITFL. When increasing the temperature from 25 up to 60 the ITS, RM and ITFL values decrease about 50%, 37.5% and 81.2%, respectively.
5. The addition of NRL replacement ratio beyond the optimum NRL ratio causes the exceed NRL films retards the hydration process, decreased density and subsequently, the strength became decrease.

6. Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support from the National Science and Technology Development Agency under the Chair Professor program (P-19-523-03) and the Rubber Authority of Thailand. The first author acknowledges the financial support for his Master studies from Suranaree University of Technology.

**KKU International Engineering Conference 2021 (KKU-IENC2021)
May 12-14, 2021 - Khon Kaen, Thailand**

7. References

- [1]. Buritatan, A., et al., *Mechanical Strength Improvement of Cement-Stabilized Soil Using Natural Rubber Latex for Pavement Base Applications*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020. **32**(12): p. 04020372.
- [2]. Horpibulsuk, S., et al., *Strength development in cement stabilized low plasticity and coarse grained soils: Laboratory and field study*. Soils and foundations, 2006. **46**(3): p. 351-366.
- [3]. Sariosseiri, F. and B. Muhunthan, *Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils*. Engineering geology, 2009. **104**(1-2): p. 119-125.
- [4]. Horpibulsuk, S., et al., *Strength development in blended cement admixed saline clay*. Applied clay science, 2012. **55**: p. 44-52.
- [5]. Tingle, J.S., et al., *Stabilization mechanisms of nontraditional additives*. Transportation research record, 2007. **1989**(1): p. 59-67.
- [6]. George, K.P., *Shrinkage characteristics of soil-cement mixtures*. Highway Research Record, 1968. **255**: p. 42-58.
- [7]. Xuan, D., A. Molenaar, and L. Houben, *Shrinkage cracking of cement treated demolition waste as a road base*. Materials and Structures, 2016. **49**(1): p. 631-640.
- [8]. Azzam, W.R., *Behavior of modified clay microstructure using polymer nanocomposites technique*. Alexandria Engineering Journal, 2014. **53**(1): p. 143-150.
- [9]. Mirzababaei, M., et al., *Stabilization of soft clay using short fibers and poly vinyl alcohol*. Geotextiles and Geomembranes, 2018. **46**(5): p. 646-655.
- [10]. Rezaeimalek, S., J. Huang, and S. Bin-Shafique, *Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization*. Construction and building Materials, 2017. **146**: p. 210-220.
- [11]. Muhammad, B. and M. Ismail, *Performance of natural rubber latex modified concrete in acidic and sulfated environments*. Construction and Building Materials, 2012. **31**: p. 129-134.
- [12]. Pinwiset, K., W. Raksuntorn, and B. Witchayangkoon, *An investigation and test of natural rubber latex soil cement road*. International Transaction Journal of Engineering Management & Applied Sciences & Technologies, 2018. **9**(2): p. 67-74.

**KKU International Engineering Conference 2021 (KKU-IENC2021)
May 12-14, 2021 - Khon Kaen, Thailand**

- [13]. Ismail, M., B. Muhammad, and N.A. Mohamad, *Durability performance of natural rubber latex modified concrete*. Malaysian Journal of Civil Engineering, 2009. **21**(2): p. 195-203.
- [14]. Muhammad, B., et al., *Elastomeric effect of natural rubber latex on compressive strength of concrete at high temperatures*. Journal of materials in civil engineering, 2011. **23**(12): p. 1697-1702.
- [15]. Diab, A.M., H.E. Elyamany, and A.H. Ali, *The participation ratios of cement matrix and latex network in latex cement co-matrix strength*. Alexandria Engineering Journal, 2014. **53**(2): p. 309-317.
- [16]. Nagaraj, T., K.S.R. Iyengar, and B.K. Rao, *Super-plasticized natural rubber latex modified concretes*. Cement and concrete research, 1988. **18**(1): p. 138-144.
- [17]. Karunaratne, S., R. John, and K. Piyadasa, *Use of natural rubber latex to improve seepage resistance of soils*. Rubber Res Inst Ceylon Quart J, 1971.
- [18]. Buritatum, A., et al., *Durability Improvement of Cement Stabilized Pavement Base Using NATURAL Rubber Latex*. Transportation Geotechnics, 2021: p. 100518.
- [19]. Yaowarat, T., et al., *Cement stabilisation of recycled concrete aggregate modified with polyvinyl alcohol*. International Journal of Pavement Engineering, 2020: p. 1-9.
- [20]. Yaowarat, T., et al., *Recycled concrete aggregate modified with polyvinyl alcohol and fly ash for concrete pavement applications*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019. **31**(7): p. 04019103.
- [21]. Yaowarat, T., et al., *Compressive and flexural strength of polyvinyl alcohol–modified pavement concrete using recycled concrete aggregates*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018. **30**(4): p. 04018046.
- [22]. Yaowarat, T., et al., *Improvement of flexural strength of concrete pavements using natural rubber latex*. Construction and Building Materials, 2021. **282**: p. 122704.

ประวัติผู้เขียน

นายไกรฤกษ์ เอี่ยมศรี เกิดเมื่อวันที่ 19 มิถุนายน พ.ศ.2538 เริ่มศึกษาชั้นปมัธยมศึกษาปีที่ 1-3 ที่โรงเรียนบุญวัฒนา ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชาการก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิค นครราชสีมา ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาเทคนิคการก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา และสำเร็จระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2561 โดยหลังจากที่สำเร็จการศึกษาแล้วมีความสนใจทางด้านปฐพีกลศาสตร์ จึงเข้าศึกษาต่อ ในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

