

คุณสมบัติทางวิศวกรรมและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตปรับปรุง
ด้วยน้ำยางพารา



นางสาวพัชรา วงศ์ทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและการบริหารงานก่อสร้าง
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2563

ENGINEERING PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF PARA-
RUBBER LATEX MODIFIED CONCRETE

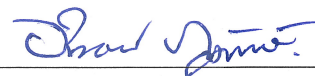


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
and Construction Management
Suranaree University of Technology
Academic Year 2020

คุณสมบัติทางวิศวกรรมและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยาฟารา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบบัณฑิตวิทยาลัย



(ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์)

ประธานกรรมการ



(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาบัณฑิตวิทยาลัย)



(ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พัชรา วงศ์ทอง : คุณสมบัติทางวิศวกรรมและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำ
ยางพารา (ENGINEERING PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF PARA-RUBBER
LATEX MODIFIED CONCRETE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข,
68 หน้า.

คำสำคัญ: คอนกรีตยางพารา/โครงสร้างทางจุลภาค/ค่ากำลังอัดของคอนกรีต/ยางพารา/
การออกแบบคอนกรีต

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของน้ำยางพาราที่มีผลต่อกำลังอัดและกำลังดัดกับร้อยละ r/c รวมถึง
การศึกษาอิทธิพลของน้ำยางพาราที่มีผลต่อความทนทานต่อโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตปรับปรุงด้วย
น้ำยางพารา พบว่า ค่ากำลังดัดของคอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยางพารามีค่าเพิ่มขึ้นตาม r/c จนกระทั่ง
ถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้กำลังดัดมีค่าสูงสุด จากนั้น ค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ r/c และ w/c
ทั้งนี้ในส่วนของการศึกษาอิทธิพลของน้ำยางพาราที่มีผลต่อความทนทานต่อโซเดียมซัลเฟตของ
คอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา พบว่า ที่อัตราส่วน w/c เดียวกัน ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงตาม
r/c ที่เพิ่มมากขึ้น ช่วยป้องกันการแทรกซึมของโซเดียมซัลเฟตเข้าสู่โครงสร้างภายในคอนกรีต จึง
ส่งผลให้คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราสามารถรับกำลังอัดและกำลังดัดได้สูงกว่าคอนกรีต
ธรรมดาภายใต้สภาวะการกัดกร่อนจากโซเดียมซัลเฟต

คอนกรีตผสมน้ำยางพาราสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนจากโซเดียมซัลเฟตได้เพิ่มขึ้นเมื่อ
เทียบกับคอนกรีตธรรมดา เมื่ออัตราส่วน r/c เพิ่มขึ้นความสามารถในการต้านซัลเฟตเพิ่มขึ้น ในส่วน
ของการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคสามารถสรุปได้ว่า การเติมน้ำยางพาราทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชัน
ของคอนกรีตลดลง มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัด จากการศึกษา SEM และ EDS บ่งบอกได้ถึง
องค์ประกอบทางเคมีของ CSH ที่เกิดขึ้นมี C ที่เป็นองค์ประกอบหลัก และมีมากขึ้นเมื่อเติม r/c มาก
ขึ้น เนื่องจากแผ่นฟิล์มยางที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขัดขวางกันดูดซึมน้ำสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชัน และ
ปริมาณ C เนื่องจากน้ำยางที่มีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วน r/c ที่เพิ่มขึ้น โดยจากการศึกษา XRD ชี้ให้เห็น
ว่าโครงสร้างภายในซีเมนต์เฟสไม่มีการมีการเปลี่ยนแปลง ในคอนกรีตธรรมดาพบ สารประกอบ Ca
Si และ Al ในปริมาณมากที่สุด แต่ในคอนกรีตผสมน้ำยาง ที่ r/c ร้อยละ 1.16 พบ Ca Si และ Al
ลดลงเล็กน้อย แต่พบปริมาณ C ที่สูงขึ้น และคอนกรีตที่ผสมน้ำยาง ที่ r/c ร้อยละ 5.78 พบ Ca Si
และ Al ต่ำที่สุด แต่พบปริมาณ C สูงที่สุด อาจสืบเนื่องและวิเคราะห์ผลได้ว่าเกิดผลมาจากปฏิกิริยาไฮ
เดรชันที่ลดลงเมื่ออัตราส่วน r/c เพิ่มขึ้น

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและการบริหารงานก่อสร้าง
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา พัชรา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข

PATCHARA WONGTHONG : ENGINEERING PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE
OF PARA-RUBBER LATEX MODIFIED CONCRETE. THESIS ADVISOR : PROF.
SUKSUN HORPIBULSUK, 68 PP.

Keyword: Concrete/Para-Rubber/Microstructure/Compressive Strength/Flexural
Strength

This research studied the effects of para-rubber latex on compressive and flexural strength and ratio of dried para-rubber latex to cement ratio (r/c), and on sodium sulfate resistance of para-rubber latex modified concrete. It was found that flexural strength of the para-rubber latex modified concrete increased with the increased r/c ratio until it attached the optimum ratio. Subsequently, the flexural strength decreased with the increase in ratio of r/c . The sodium sulfate resistance test results revealed that the flexural strength of the para-rubber latex modified concrete at the same w/c ratio decreased as the r/c ratio increased. The rubber latex prevented the penetration of sodium sulfate into the internal structure of concrete. Therefore, para-rubber latex modified concrete could have compressive and flexural strengths higher than the normal concrete under the same sodium sulfate attack condition.

Para-rubber latex modified concrete was more durable against sodium sulphate attack when the r/c ratio increased. The microstructural test results revealed that rubber particles filled in the pores of concrete structure. Therefore, the water absorption and resistances to sodium sulphate attack of para-rubber latex modified were improved.

School of Civil Engineering and Construction Management
Academic Year 2020

Student's Signature 

Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ผู้ซึ่งให้แนวคิด โอกาส และคำแนะนำในการแก้ไขปัญหา รวมทั้งช่วยตรวจทาน เนื้อหาอย่างละเอียดรวดเร็ว อันเป็นความกรุณาและคุณประโยชน์ต่อผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ (1) ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์ (ประธาน กรรมการ) และ (2) ดร.อภิชาติ สุตดีพงษ์ (กรรมการ) ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำทำให้ วิทยานิพนธ์นี้ถูกต้อง ครบถ้วนสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและการบริหารงานก่อสร้าง ซึ่งเป็นความรู้และ ประสบการณ์ที่มีค่าและมีประโยชน์ในการทำงานของผู้ศึกษาต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และโอกาสที่ดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ณัฐชัย โปรัมย์ณี และดร.ฤทัยทิพย์ วิเศษศรี อาจารย์ประจำคณะ วิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ ที่ได้ ช่วยเหลือสนับสนุน และให้คำปรึกษาจนกระทั่งการดำเนินงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนพี่น้อง สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและการบริหารงานก่อสร้าง รุ่นที่ 19 ทุกท่าน ที่ช่วยเหลือกัน ร่วมฟันฝ่าอุปสรรคจนถึงจุดหมายปลายทางของการศึกษา

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ขอขอบคุณน้องสาว ขอขอบคุณน้องชาย และ ครอบครัวที่สนับสนุนคอยให้กำลังใจ และคำปรึกษาจนสามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยดี จึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

พัชรา วงศ์ทอง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	9
2.3 ยางพารา	10
2.4 การใช้น้ำยางพาราผสมในงานคอนกรีต.....	11
2.5 ส่วนผสมของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา	13
2.6 สมบัติเชิงกลของคอนกรีต.....	14
2.7 การวิเคราะห์โครงสร้างแบบจูลภาค.....	15
3 วิธีดำเนินงานวิจัย	19
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	19
3.2 วัสดุดิบและอุปกรณ์.....	21
3.3 อัตราส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตผสมยางพารา.....	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย	22
4 ผลการดำเนินงานวิจัยและวิเคราะห์ผล.....	24
4.1 สมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ มวลรวม และน้ำยาขังพารา	24
4.1.1 ปูนซีเมนต์.....	24
4.1.2 มวลรวมหยาบ.....	25
4.1.3 มวลรวมละเอียด.....	26
4.1.4 น้ำยาขังพารา.....	28
4.2 ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมและความทนทานต่อโซเดียมซัลเฟต	29
4.2.1 การออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีต	29
4.2.2 ผลการทดสอบของคอนกรีตผสมน้ำยาขังพารา	30
4.3 โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure).....	53
4.3.1 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	53
4.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค EDS	55
4.3.3 การวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	56
4.3.4 การวิเคราะห์ความพรุน (Pore Size Analyzer).....	61
5 สรุปและข้อเสนอแนะ	63
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	63
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	64
รายการอ้างอิง	65
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิจัยเต็มรูปแบบในการประชุมวิชาการระดับชาติ.....	66
ประวัติผู้เขียน	68

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	อัตราส่วนผสมและจำนวนตัวอย่างทดสอบของงานในส่วนที่ 1 และ ส่วนที่ 2.....	20
4.1	เกณฑ์กำหนดสมบัติพื้นฐานเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ตามมาตรฐานอเมริกัน ASTM C-150 TYPE 1 ที่ผลิตตาม มอก. 15 เล่ม 1-2555.....	24
4.2	ผลทดสอบสมบัติพื้นฐานของมวลรวมหยาบ ตามข้อกำหนดที่ ทล.- ก. 202/2544	26
4.3	ผลทดสอบสมบัติพื้นฐานมวลรวมละเอียดข้อกำหนดที่ ทล.- ก. 201/2544.....	37
4.4	ผลการทดสอบน้ำย่างพารา.....	28
4.5	อัตราส่วนผสม $w/c = 0.3$ ที่น้ำย่างพาราปริมาณต่าง ๆ.....	29
4.6	อัตราส่วนผสม $w/c = 0.4$ ที่น้ำย่างพาราปริมาณต่าง ๆ.....	29
4.7	อัตราส่วนผสม $w/c = 0.5$ ที่น้ำย่างพาราปริมาณต่าง ๆ.....	30

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กำลังอัดของคอนกรีตผสมน้ำยาฟารา..... 6
2.2	กำลังดัดของคอนกรีตผสมน้ำยาฟารา..... 7
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำยาฟาราต่อปูนซีเมนต์..... 8
2.4	น้ำยาฟาราที่สามารถนำมาใช้ในการผสมคอนกรีต..... 12
2.5	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 17
2.6	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์..... 17
2.7	เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและความพรุน..... 18
4.1	การกระจายขนาดคละของมวลรวมหยาบ 25
4.2	การกระจายขนาดคละของมวลรวมละเอียด..... 27
4.3(a)	ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive strength กับ r/c ที่อายุการบ่ม 7 วัน..... 31
4.3(b)	ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive strength กับ r/c ที่อายุการบ่ม 14 วัน 31
4.3(c)	ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive strength กับ r/c ที่อายุการบ่ม 28 วัน 32
4.4(a)	ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress กับ Strain ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3 ที่อายุการบ่ม 7 วัน 33
4.4(b)	ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress กับ Strain ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3 ที่อายุการบ่ม 14 วัน 33
4.4(c)	ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress กับ Strain ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3 ที่อายุการบ่ม 28 วัน 34
4.5(a)	ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress กับ Strain ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4 ที่อายุการบ่ม 7 วัน 34
4.5(b)	ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress กับ Strain ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4 ที่อายุการบ่ม 14 วัน 35
4.5(c)	ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress กับ Strain ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4 ที่อายุการบ่ม 28 วัน 35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress กับ Strain ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 ที่อายุการบ่ม 7 วัน	36
4.6(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress กับ Strain ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 ที่อายุการบ่ม 14 วัน	36
4.6(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress กับ Strain ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 ที่อายุการบ่ม 28 วัน	37
4.7(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength กับ r/c ที่อายุการบ่ม 7 วัน	38
4.7(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength กับ r/c ที่อายุการบ่ม 14 วัน	38
4.7(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength กับ r/c ที่อายุการบ่ม 28 วัน	39
4.8(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress กับ Displacement ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3 ที่อายุการบ่ม 7 วัน	39
4.8(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress กับ Displacement ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3 ที่อายุการบ่ม 14 วัน	40
4.8(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress กับ Displacement ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3 ที่อายุการบ่ม 28 วัน	40
4.9(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress กับ Displacement ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4 ที่อายุการบ่ม 7 วัน	41
4.9(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress กับ Displacement ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4 ที่อายุการบ่ม 14 วัน	41
4.9(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress กับ Displacement ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4 ที่อายุการบ่ม 28 วัน	42
4.10(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress กับ Displacement ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 ที่อายุการบ่ม 7 วัน	42
4.10(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress กับ Displacement ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 ที่อายุการบ่ม 14 วัน	43
4.10(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress กับ Displacement ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 ที่อายุการบ่ม 28 วัน	43

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง flexural toughness กับ อัตราส่วน r/c ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3.....	44
4.11(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง flexural toughness กับ อัตราส่วน r/c ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4.....	45
4.11(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง flexural toughness กับ อัตราส่วน r/c ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5.....	45
4.12(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive Strength กับ อัตราส่วน r/c ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3.....	46
4.12(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive Strength กับ อัตราส่วน r/c ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4.....	47
4.12(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive Strength กับ อัตราส่วน r/c ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5.....	47
4.13(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive Strength loss กับ อายุบ่มในโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3.....	48
4.13(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive Strength loss กับ อายุบ่มในโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4.....	49
4.13(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive Strength loss กับ อายุบ่มในโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5.....	49
4.14(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength กับ อัตราส่วน r/c ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3.....	50
4.14(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength กับ อัตราส่วน r/c ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4.....	51
4.14(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength กับ อัตราส่วน r/c ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5.....	51
4.15(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength loss กับ อายุบ่มในโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3.....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength loss กับ อายุบ่มในโซเดียมซิลเฟต ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4.....	52
4.15(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength loss กับ อายุบ่มในโซเดียมซิลเฟต ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5.....	53
4.16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วย น้ำยางพารา(r/c ratio) (a) 0% (b) 1% (c) 1.5% และ (d) 5% (w/c = 0.4).....	54
4.17 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วย น้ำยางพารา (r/c ratio) (a) 0% (b) 1% (c) 1.5% และ (d) 5% (w/c = 0.5).....	55
4.18(a) ผลการวิเคราะห์ EDS ที่ w/c = 0.4	56
4.18(b) ผลการวิเคราะห์ EDS ที่ w/c = 0.5	56
4.19 กราฟแสดงตัวอย่างผล XRD ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 ที่ 0% Latex.....	58
4.20 กราฟแสดงตัวอย่างผล XRD ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 ที่ 5% Latex.....	58
4.21(a) แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ที่อัตราส่วน w/c = 0.4, 0% Latex	59
4.21(b) แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ที่อัตราส่วน w/c = 0.4, 0.5% Latex.....	59
4.21(c) แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ที่อัตราส่วน w/c = 0.4, 1% Latex.....	59
4.21(d) แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ที่อัตราส่วน w/c = 0.4, 5% Latex.....	60
4.21(e) แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ที่อัตราส่วน w/c = 0.5, 0% Latex.....	60
4.21(f) แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ที่อัตราส่วน w/c = 0.5, 0.5% Latex	60
4.21(g) แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ที่อัตราส่วน w/c = 0.5, 1% Latex.....	61
4.21(h) แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ที่อัตราส่วน w/c = 0.5, 5% Latex.....	61
4.22 ปริมาตรของรูพรุน (total pore volume) ของคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา.....	62

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

pH	=	ค่าที่แสดงความเป็นกรดเป็นเบสของสารเคมี
DRC	=	Dry rubber content
P/C	=	อัตราส่วนของเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์
w/c	=	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
CS	=	Compressive Strength
FS	=	Flexural Strength
SEM	=	Scanning electron microscopy
EDS	=	Energy Dispersive X-Ray Spectrometer
XRD	=	X-Ray Diffract meter
WD-XRF	=	Wavelength dispersive X-ray Fluorescence
X-ray	=	รังสีเอ็กซ์
B	=	ธาตุโบรอน
U	=	ธาตุยูเรเนียม
Be	=	ธาตุเบริลเลียม
U	=	ธาตุยูเรเนียม
Percent	=	เปอร์เซ็นต์
ppm	=	ระดับส่วนในล้านส่วน
กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร	=	Kilogram Per Square Centimeter
RAP-MRL-Cement	=	ยางพาราปรับสภาพ
C ₃ S	=	tricalcium silicate, 3CaO . SiO ₂
C ₂ S	=	dicalcium silicate, 2CaO . SiO ₂
C ₃ A	=	tricalcium aluminate, 3CaO . Al ₂ O ₃
C ₄ AF	=	tetracalcium ferro aluminate, 4CaO . Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃
C ₅ H ₈	=	1-methylcyclobutene
LMC	=	Latex Modified Concrete
LMM	=	Latex Modified Mortar
N ₂	=	แก๊สไนโตรเจน

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Ar ²	=	แก๊สอาร์กอน
CO ₂	=	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
H ₂	=	ก๊าซไฮโดรเจน
ASTM C192	=	มาตรฐานการทำก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก
มอก.	=	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
ทล.-ก201	=	กรมทางหลวง ข้อกำหนดมวลรวมละเอียดสำหรับผสมคอนกรีต
ทล.-ก202	=	กรมทางหลวง ข้อกำหนดมวลรวมหยาบสำหรับผสมคอนกรีต
F	=	Type F superplasticizer
มทช.(ท) 303-2545	=	มาตรฐานงานทางหลวงชนบท วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าแรงอัด แกนเดียว
AASHTO	=	The American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
มอก.15 เล่ม 1-2547	=	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ
มอก.15 เล่ม 1-2555	=	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (แก้ไขจากเล่ม 1-2547)
MgO	=	แมกนีเซียมออกไซด์
SO ₃	=	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์
3CaO.SiO ₂	=	ไตรแคลเซียมซิลิเกต
3CaO.Al ₂ O ₃	=	ไตรแคลเซียมอลูมิเนต
Na ₂ O	=	โซเดียมออกไซด์
K ₂ O	=	โพแทสเซียมออกไซด์
Na ₂ SO ₄	=	โซเดียมซัลเฟต
F.M.	=	Fineness modulus
ISO	=	International Organization for Standardization
SSD	=	สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง
PVA	=	polyvinyl alcohol
ทล.-ม. 309/2544	=	กรมทางหลวง มาตรฐานถนนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญในการสร้างรายได้เข้าสู่ประเทศไทย เป็นพืชที่มีการส่งออกมากเป็นอันดับสอง รองจากการส่งออกข้าว และมีปริมาณในการส่งออกทางธรรมชาติเป็นอันดับหนึ่งของโลก แต่ในปัจจุบันเกษตรกรผู้ปลูกยางพาราในประเทศไทย มีปัญหาในส่วนของราคายางพาราในประเทศไทยที่ตกต่ำลงอย่างน่าเป็นห่วง หลังเกิดจากอุปทานยางพาราในโลกเพิ่มสูงขึ้น ประเทศจีนซึ่งเป็นผู้บริโภคยางพาราอันดับ 1 ของโลกและเป็นผู้นำเข้ายางพาราอันดับ 1 ของไทย ได้มีแนวโน้มที่จะขยายพื้นที่เพาะปลูกยางพาราทั้งในและต่างประเทศ อาทิ กัมพูชา ลาว เมียนมาร์ และเวียดนามอย่างต่อเนื่อง เพื่อตอบสนองต่อความต้องการในการใช้ยางพาราในประเทศของตนเอง ทำให้มียางพาราออกมาสู่ตลาดอย่างมากมาย บทบาทของการส่งออกยางพาราจากประเทศไทยในตลาดยางพาราโลกจึงลดลง

น้ำยางพาราที่กรี๊ดได้จากต้นยางจะเรียกว่าน้ำยางสด ซึ่งเป็นน้ำยางพาราที่ได้จากต้นยาง ลักษณะเป็นเม็ดขนาดเล็ก ๆ กระจายอยู่ในน้ำ มีลักษณะของน้ำยางพาราไว้ว่า มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว มีสภาพเป็นคอลลอยด์ มีปริมาณของแข็งประมาณร้อยละ 30-40 pH 6.5-7 โดยน้ำยางพาราจะมีความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร (พงษ์ธร แซ่ฮุย, 2547)

ส่วนประกอบในน้ำยางสดแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง และส่วนที่เป็นน้ำยางสด ซึ่งน้ำยางสดจะสามารถคงสภาพความเป็นน้ำยางอยู่ได้ไม่เกิน 6 ชั่วโมง เนื่องจากแบคทีเรียในอากาศ และจากเปลือกของต้นยางขณะกรี๊ดยางจะลงไปปนในน้ำยางพารา และกินสารอาหารที่อยู่ในน้ำยางพารา เช่น โปรตีน น้ำตาล ฟอสโฟไลปิด โดยแบคทีเรียจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลังจากแบคทีเรียกินสารอาหาร คือ จะเกิดการย่อยสลายได้เป็นก๊าซชนิดต่าง ๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน เกิดการบูดเน่าและส่งกลิ่นเหม็น การที่มีกรดที่ระเหยง่ายในน้ำยางพาราที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่า pH ของน้ำยางพาราเปลี่ยนแปลงมีค่าที่ลดลง ดังนั้นเพื่อป้องกันการสูญเสียสภาพของน้ำยางพารา จึงต้องมีการใส่สารเคมีลงไปเพื่อเก็บรักษาน้ำยางพาราให้คงสภาพเป็นของเหลว โดยสารเคมีที่ใช้ในการเก็บรักษาน้ำยางพาราเรียกว่า สารป้องกันการจับตัว (Anticoagulant) ได้แก่ แอมโมเนีย โซเดียมซัลไฟด์ พอร์มาลดีไฮด์ เป็นต้น เพื่อที่รักษาน้ำยางพาราไม่ให้เสียสูญเสียสภาพ (เสาวณีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี, 2547)

คอนกรีต คือ วัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันมานานอย่างแพร่หลาย ซึ่งคอนกรีตประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำ ทราย หินหรือกรวด และน้ำยาผสมคอนกรีต เมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพของเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง หลังจากนั้น นำไปเทลงในแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการ ก็จะเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็ง โดยเป็นของแข็งที่มีความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้ คอนกรีตที่ดีต้องมีสมบัติ เป็นที่พอใจทั้งในสภาพคอนกรีตเหลว กล่าวคือ ตั้งแต่การผสม การลำเลียงจากเครื่องผสม การเทลงแบบหล่อ และการอัดแน่น และเป็นที่ยอมรับในสภาพคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว คือต้องได้กำลังอัดตามข้อกำหนด นอกจากนี้ต้องมีสมบัติอื่น ๆ อีก เช่น ความหนาแน่น ความทนทาน ความสามารถรับแรงดึง ความต้านทานการซึมผ่านของน้ำหรือของเหลว ความต้านทานต่อแรงกระแทกและเสียดสี การทนต่อการกัดกร่อนจากซัลเฟตและอื่น ๆ สำหรับความรู้ในเรื่องสมบัติของคอนกรีต ทำให้สามารถที่จะเลือกสัดส่วนในการผสมคอนกรีตได้อย่างเหมาะสมในราคาที่ถูกและประหยัด รวมทั้งทราบถึงปัจจัยในการทำคอนกรีตที่ดีเพื่อให้เกิดประโยชน์ทั้งด้านการประหยัดและประโยชน์ด้านเทคนิค โดยมีกระบวนการในการทำคอนกรีตตามปัจจัยที่ควรนำมาพิจารณาหรือคำนึงถึง เพื่อให้ได้คอนกรีตที่ดีและมีราคาที่เหมาะสม

ในงานด้านวิศวกรรมการนำน้ำยางพาราหรือน้ำยางธรรมชาติมาประยุกต์ใช้กับงานคอนกรีตถือว่าเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับยางพาราของประเทศไทยได้ ซึ่งน้ำยางธรรมชาติจะมีความยืดหยุ่นและความเหนียว คล้ายกับซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) ดังนั้น เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการก่อสร้างก็จะสามารถพัฒนาเป็น คอนกรีตผสมยางพารา โดยการใช้สำหรับงานชั้นพื้นทาง การทำถนน การซ่อมแซมถนน เป็นต้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการใช้น้ำยางชั้นที่มีปริมาณยางแห้ง (Dry rubber content) ร้อยละ 2.0 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์เพิ่มความเหนียว (Ductility) ของคอนกรีตได้ โดยไม่ทำให้กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมน้ำยางพารา ซึ่งการนำน้ำยางพารามาผสมกับคอนกรีตก็จะสามารถชี้ให้เห็นถึงการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา ที่มีส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อสร้างความแข็งแรงให้กับคอนกรีตได้ จากผลการวิจัยที่ผ่านมา ได้การศึกษาศักยภาพการสูญเสียน้ำเนื่องจากการรั่วซึมในแบบจำลองคลองชลประทานที่มีส่วนผสมของน้ำยางพารา และการพัฒนาสูตรมอร์ต้าผสมน้ำยางพาราสำหรับใช้เป็นตัวเชื่อมประสานรอยร้าวในคลองส่งน้ำชลประทาน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำยางพาราผสมคอนกรีต (Concrete) หรือ มอร์ต้า (Mortar) ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำให้มีการป้องกันการรั่วซึมของน้ำได้ดีและสมบัติทางกลของคอนกรีตและมอร์ต้ามีค่าสูงกว่ามาตรฐาน (พีริวัฒน์ปลาเงิน, 2559)

การเพิ่มมูลค่าของน้ำยางพาราโดยนำมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีต ต้องมีการศึกษาพัฒนาสมบัติและทดสอบหาสูตรที่เหมาะสมในการใช้งานโดยเน้นเรื่องความแข็งแรง ทนทาน น้ำหนักเบา พร้อมกับทดสอบสมบัติทางกลทั้งความยืดหยุ่น ความอ่อนตัว ค่ากำลังอัด ค่ากำลังดึงและระยะเวลา

ในการก่อตัว ความสามารถในการเข้าแบบที่ดีกว่าคอนกรีตทั่วไป ถือว่าเป็นการดั่งสมบัติของน้ำ ยางพาราออกมาใช้ทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพมากขึ้น (เจริญชัย ฤทธิรัฐ, 2559)

สิทธิชัย ศิริพันธุ์ และคณะ (2548) ได้ศึกษาหาเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการผสมน้ำยางพารา ในคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตผสมน้ำยางพาราจะมีกำลังอัดลดลงประมาณ ร้อยละ 60 และเมื่อปริมาณน้ำยางเพิ่มขึ้น การรับกำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง สำหรับค่ากำลังดัด พบว่า ลดลงประมาณร้อยละ 10 เมื่ออัตราส่วนของเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ (P/C) ที่เพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตผสม น้ำยางพาราจะมีค่ากำลังดัดสูงกว่าคอนกรีตปกติ เนื่องจากอนุภาคเนื้อยางเกาะตัวกันเป็นชั้นฟิล์ม (film) ที่แข็งแรงขึ้น ทางผู้วิจัยรายงานว่าการใช้งานคอนกรีตผสมน้ำยาง ยังไม่เหมาะกับงานโครงสร้าง ที่ต้องรับแรงอัดมาก แต่อาจเหมาะกับงานซ่อมแซม หรือเหมาะกับงานคอนกรีตบล็อกสำหรับก่อผนัง ที่มีการรับแรงอัดไม่มาก

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีต ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา โดยการศึกษาความสัมพันธ์กำลังอัด กำลังดัด ความพรุน และความทนทาน ต่อโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตปรับปรุงด้วยยางพาราในพจน์ของอัตราส่วนเนื้อยางต่อปริมาณ ปูนซีเมนต์ (r/c) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต ทั้งนี้จะทำการศึกษา โครงสร้างภายในของคอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา โดยวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างแบบจุลภาค (Microstructure analysis) ซึ่งประกอบด้วย วิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ วิเคราะห์พื้นผิวและความพรุน ผล การศึกษาจะนำมาซึ่งความเข้าใจอิทธิพลของน้ำยางธรรมชาติต่อการปรับปรุงสมบัติทางวิศวกรรมและ ความทนทานของคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราในระดับโครงสร้างจุลภาค

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก คือ ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมและโครงสร้างจุลภาคของ คอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา โดยแบ่งเป็นวัตถุประสงค์ย่อยดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและกำลังดัดกับอัตราส่วนเนื้อยางต่อ ปูนซีเมนต์ (r/c)

1.2.2 เพื่อศึกษาความพรุนและความทนทานต่อโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตปรับปรุงด้วย ยางพารา โดยวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างแบบจุลภาค (Microstructure analysis)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วนคือ (1) ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีต ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา (2) ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา โดยการ

วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure analysis)

การศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา โดยการนำตัวอย่างคอนกรีตผสมน้ำยางพารา มาทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength, CS) และทดสอบกำลังดัด (Flexural Strength, FS) พร้อมทั้งการวิเคราะห์ค่ากำลังอัดและค่ากำลังดัดของคอนกรีตผสมยางพารากับอัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา โดยการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure analysis) มีเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย ดังนี้

1.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM)

1.3.2 เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS) โดยการวิเคราะห์หาธาตุในตัวอย่าง ตั้งแต่ธาตุโบรอน (B) ถึง ธาตุยูเรเนียม (U) และสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative)

1.3.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffract meter: XRD) โดยการนำรังสีเอ็กซ์ (X-ray) มาใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกและระบุชนิดสารประกอบที่มีอยู่ในตัวอย่างทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative)

1.3.4 เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและความพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzer) โดยใช้เทคนิคการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และเทคนิคการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ด้วยหลักการวัดปริมาตรของแก๊สในสถานะสุญญากาศ ณ ความดันคงที่ (Vacuum volumetric technique)

1.4 ประโยชน์ของงานวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและกำลังดัดกับอัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์

1.4.2 ทราบถึงความพรุนและความทนทานต่อโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตปรับปรุงด้วยยางพารา โดยวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างแบบจุลภาค (Microstructure analysis)

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

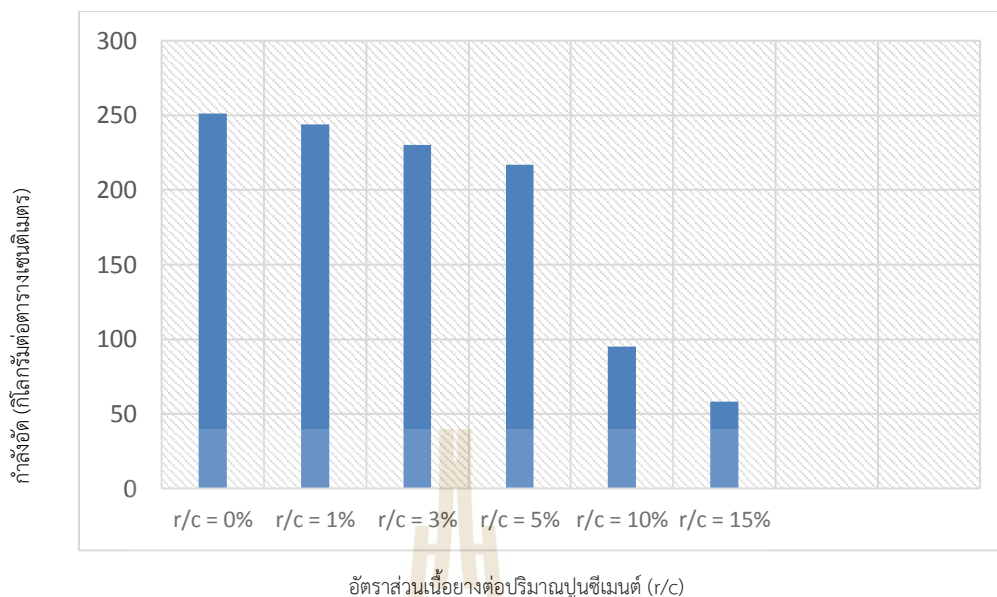
2.1 บทนำ

การผสมคอนกรีต เป็นการนำปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ และน้ำยาฟอยามมาผสมคลุกเคล้าเข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่พอเหมาะ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเคลือบหรือหุ้มผิวของมวลรวมทั้งหมดด้วยซีเมนต์เพสต์ และเพื่อผสมส่วนผสมทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกัน สร้างความแข็งแรงให้กับคอนกรีต อันจะส่งผลให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดี

พีรวัฒน์ ปลาเงิน และคณะ (2559) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลของคอนกรีตผสมน้ำยาฟอยามซึ่งได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลและการดูซึมน้ำของคอนกรีตผสมน้ำยาฟอยาม โดยกำหนดอัตราส่วนของเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ (Rubber/Cement Ratio, r/c) เท่ากับ ร้อยละ 0, 1, 2, 5, 10 และ 15 ตามลำดับ กำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (Water/Cement, w/c) เท่ากับ 0.60 โดยมีขั้นตอนในการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตผสมน้ำยาฟอยามในห้องปฏิบัติการ ดังนี้

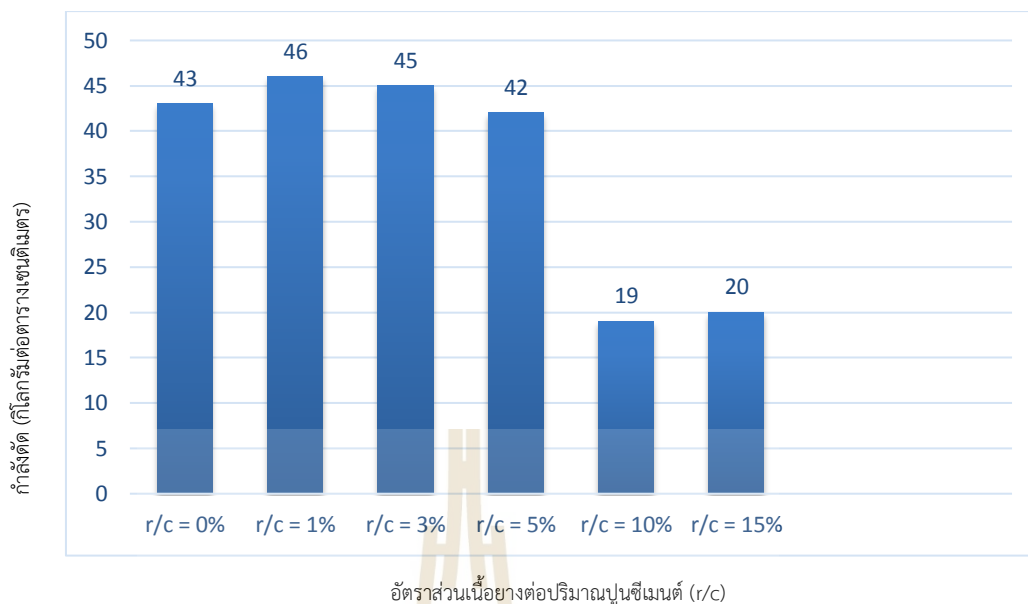
- 1) การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมน้ำยาฟอยาม
- 2) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต
- 3) กำลังตัดของคอนกรีต

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมน้ำยาฟอยาม จะการทดสอบกำลังอัดโดยมีการบ่มตัวอย่างชิ้นงานคอนกรีตที่ระยะการบ่ม 28 วัน ทำการทดสอบคอนกรีตผสมน้ำยาฟอยามที่อัตราส่วน r/c เท่ากับ ร้อยละ 0, 1, 2, 5, 10 และ 15 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดในห้องปฏิบัติการ พบว่าความสามารถในการรับแรงอัดของคอนกรีตผสมน้ำยาฟอยาลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตมาตรฐาน (r/c = 0%) มีค่ากำลังรับแรงอัด 251 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หลังจากผสมน้ำยาฟอยามในคอนกรีต r/c เท่ากับ ร้อยละ 1, 3 และ 5 ได้ค่ากำลังรับแรงอัด 244, 230 และ 217 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งลดลงประมาณ ร้อยละ 3 – 17 และเมื่อผสมน้ำยาฟอยามในปริมาณ r/c เท่ากับ ร้อยละ 10 และ ร้อยละ 15 พบว่า ความสามารถในการรับแรงอัดของคอนกรีตลดเหลือเพียง 95 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ 58 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากปริมาณเนื้อยางค่อนข้างมาก (พีรวัฒน์ ปลาเงิน และคณะ, 2559)



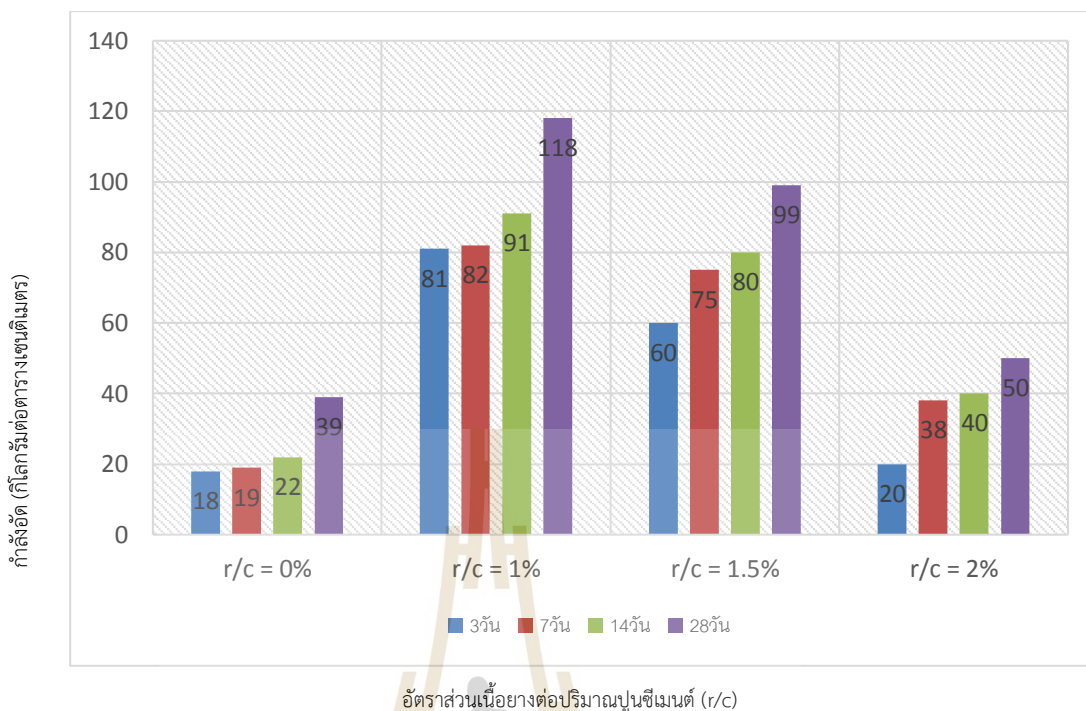
รูปที่ 2.1 กำลังอัดของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา (พีรวัฒน์ ปลาเงิน และคณะ, 2559)

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา เป็นการหาค่าจากแรงสูงสุดทำให้เกิดการแตกหักในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ ที่อัตราส่วนเนื้อยางต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (r/c) เท่ากับ ร้อยละ 0, 1, 2, 5, 10 และ 15 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 กำลังอัดสูงสุดที่อัตราส่วน r/c เท่ากับ ร้อยละ 1 มีค่าเท่ากับ 46 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่คอนกรีตมาตรฐานมีค่ากำลังอัด 43 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และคอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วน r/c เท่ากับ ร้อยละ 10 และ 15 มีค่ากำลังอัดค่อนข้างต่ำ คือ 19 และ 20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณเนื้อยางพาราที่มากเกินไป ทำให้เกิดช่องว่างในเนื้อคอนกรีตที่แข็งตัว จึงส่งผลกระทบต่อแรงอัดของคอนกรีต กำลังอัดมีลักษณะสอดคล้องกับกำลังรับแรงอัดและแรงดึงของคอนกรีต กล่าวคือเมื่อผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง แต่เป็นที่น่าสังเกตถ้าผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วนร้อยละ 1 – 3 ทำให้สมบัติการรับแรงอัดของคอนกรีตสูงขึ้นประมาณ ร้อยละ 5 – 7 (พีรวัฒน์ ปลาเงิน และคณะ, 2559)



รูปที่ 2.2 กำลังอัดของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา (พีรวัฒน์ ปลาเงิน และคณะ, 2559)

ประชุม คำพุด (2550) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ ร้อยละ 0, 0.10, 0.15 และ 0.20 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ตามลำดับ ทำการผสมและอบน้ำตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541 นำมาทดสอบค่าความหนาแน่น ค่ากำลังอัดและค่ากำลังดัด ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ค่าการดูดกลืนน้ำที่อายุ 7 และ 28 วัน ผลการวิจัย พบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาจะแปรผกผันกับอัตราส่วนของน้ำยางพาราต่อปูนซีเมนต์ ในขณะที่ค่ากำลังดัดของคอนกรีตจะแปรผันตรงกับอัตราส่วนของน้ำยางพาราต่อปูนซีเมนต์ โดยที่เมื่อผสมน้ำยางพารามากขึ้นค่ากำลังอัดจะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แต่ค่ากำลังดัดจะเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นจะแปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำยางพาราต่อปูนซีเมนต์ ค่าการดูดกลืนน้ำจะแปรผันตรงกับอัตราส่วนน้ำยางพาราต่อปูนซีเมนต์ค่าการเปลี่ยนแปลงความยาว (ร้อยละการหดตัว) มีค่าไม่แน่นอนในแต่ละอัตราส่วนน้ำยางพาราต่อปูนซีเมนต์ และมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมากกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบปกติอยู่เล็กน้อย โดยปริมาณน้ำยางพาราที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้ คือ การใช้อัตราส่วนน้ำยางพาราต่อปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0.10 เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วน้ำยางพาราสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบปานกลางที่สามารถรับกำลังได้สูงและเป็นฉนวนป้องกันความร้อนได้ดี



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและ r/c (ประชุม คำพุ่ม, 2550)

กฤษฎา กิจเจริญ (2561) ได้ศึกษากำลังอัดและโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีต ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์และน้ำยางพาราปรับสภาพ ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ทดสอบสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า ตัวอย่างผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ และตัวอย่างผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์และน้ำยางพาราปรับสภาพ นำก้อนตัวอย่างบ่มโดยใช้พลาสติกห่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน เมื่อครบกำหนดตามอายุบ่มที่ต้องการนำก้อนตัวอย่างไปทดสอบหาค่ากำลังอัด (Compressive Strength) และกำลังดัด (Flexural Strength) และวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี (Element) ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแลลส่องกราดร่วมกับเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectrometer, SEM/EDS) โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ ได้แก่ ปริมาณเถ้าลอย, ปริมาณสารกระตุ้นอัลคาไลน์, ปริมาณน้ำยางพาราปรับสภาพ และระยะเวลาในการบ่ม

จากผลการทดลองพบว่าค่ากำลังอัดที่ 7 วันของทั้งตัวอย่างมีค่าสูงกว่าค่ากำลังอัดซึ่งกำหนดโดยกรมทางหลวงชนบทที่ 17.24 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับงานปรับปรุงคุณภาพชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base) เมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของตัวอย่าง

จีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น และเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้นกำลังอัดก็จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันสำหรับตัวอย่าง RAP-MRL-FA Geopolymer ปริมาณสารกระตุ้นอัลคาไลน์และปริมาณน้ำยารักษา ปรับสภาพส่งผลกระทบต่อการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ จึงทำให้ค่ากำลังอัดและกำลังดัดลดลงเมื่อปริมาณน้ำยารักษาปรับสภาพเพิ่มขึ้น แต่จะมีค่ากำลังอัดและกำลังดัดเพิ่มขึ้นเมื่อนำผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าผสมปูนซีเมนต์และยางพาราปรับสภาพ (RAP-MRL-Cement) การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีได้ยืนยันการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันของตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงคุณภาพ (กฤษฎา กิจเจริญ, 2561)

2.2 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่งที่ยอมรับใช้แพร่หลายทั่วโลกในงานก่อสร้างปัจจุบัน เป็นวัสดุหลักในการผลิตคอนกรีต ปูนมอร์ตาร์ และปูนสูตรพิเศษประเภทต่าง ๆ มีส่วนผสมหลัก คือ หินปูน หินดินดาน ดินลูกรัง และทราย รวมถึงการเพิ่มสารอื่น ๆ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของปูนซีเมนต์ เช่น ยิปซัม สารปอซโซลาน สารลดน้ำ เป็นต้น โดยซีเมนต์ชนิดนี้มีสารประกอบรวมกันอยู่หลายชนิด แต่มีสารประกอบพื้นฐาน 4 ชนิด คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (tricalcium silicate, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) แทนด้วยสัญลักษณ์ C_3S , ไดแคลเซียมซิลิเกต (dicalcium silicate, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) แทนด้วยสัญลักษณ์ C_2S , ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (tricalcium aluminate, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) แทนด้วยสัญลักษณ์ C_3A และ เตตระแคลเซียมเฟอร์โรอะลูมิเนต (tetracalcium ferro aluminate, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) แทนด้วยสัญลักษณ์ C_4AF สัญลักษณ์ที่ใช้แทนสารประกอบดังกล่าวนี้ ถูกกำหนดขึ้นโดยสมาคมซีเมนต์ (Cement Association) ทั้งนี้ มาตรฐานปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ของไทย คือ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ หรือ มอก.15 เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ (สมาคมซีเมนต์ และ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ หรือ มอก.15 เล่ม 1) สามารถแบ่งปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

- 1) ประเภท 1 (Type 1) : ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement)
- 2) ประเภท 2 (Type 2) : ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement)
- 3) ประเภท 3 (Type 3) : ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดสูงเร็ว (High Early Strength Portland Cement)
- 4) ประเภท 4 (Type 4) : ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement)
- 5) ประเภท 5 (Type 5) : ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตสูง (Sulfate Resistance Portland Cement)

จากการศึกษาสมบัติพื้นฐานของสารประกอบหลักในซีเมนต์ พบว่า C_3S และ C_2S มีความสำคัญต่อการพัฒนากำลังของซีเมนต์อย่างมาก (ประมาณร้อยละ 70-80% ของซีเมนต์) ในขณะที่ C_3A และ C_4AF มีความสำคัญต่อกำลังของซีเมนต์น้อยกว่า ยังสร้างรอยแตกกว้างให้คอนกรีตเนื่องจาก C_4AF ไปทำปฏิกิริยากับซัลเฟต ได้ ettringite ซึ่งมีผลทำให้โครงสร้างเพลสขยายตัวมากกว่าที่ต้องการ และเป็นที่น่าทึ่งว่า ในซีเมนต์มีสารประกอบพื้นฐานหลายชนิด (ทั้งสารประกอบหลักและรอง) เมื่อนำซีเมนต์ผสมกับน้ำก็จะเกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือ “ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับซีเมนต์” เกิดการสร้างสารประกอบตัวใหม่ โดยการทำให้ปฏิกิริยาจะพิจารณาตามสารประกอบพื้นฐาน 3 กลุ่ม (4 ชนิด) คือ กลุ่มที่ 1 สารประกอบ C_3S และ C_2S , กลุ่มที่ 2 สารประกอบ C_3A และกลุ่มที่ 3 สารประกอบ C_4AF ในส่วนของ ปฏิกิริยา C_3A และ C_4AF พบว่า ปริมาตรของผลผลิตที่เกิดจาก C_3A และ C_4AF มีปริมาตรเพียงร้อยละ 15-20 ของเพลสค์ อาจกล่าวได้ว่ามีผลน้อยมากต่อสมบัติของโครงสร้างเพลสค์ (อมร พิมานมาศ และคณะ, 2556)

2.3 ยางพารา

ต้นยางพารา (Para rubber tree) หรือยางพารา เป็นพืชประเภทต้นไม้ยืนต้น ที่มีขนาดใหญ่ชนิดใบเป็นใบเลี้ยงคู่ ในส่วนสารประกอบของน้ำยางพาราจะมีโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งน้ำยางพาราเป็นสารประกอบโพลิเมอร์ประเภทไฮโดรคาร์บอน มีโครงสร้างโมเลกุลแบบ cis1,4 polyisoprene มีน้อยกว่าร้อยละ 98 และมีสูตรทางเคมีคือ C_5H_8 เกิดจากการเชื่อมต่อกันหลาย ๆ หน่วยโมเลกุล ในการต่อแบบปลายประมาณ 5,000-6,000 หน่วยขึ้นไป

โดยเนื้อยางจะมีลักษณะเป็นทรงกลมมีขนาดในระดับไมโครมิเตอร์ อาศัยอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลวก็คือ น้ำ หลังจากนั้น จึงได้มีการปรับปรุงสมบัติของยางพาราเพื่อให้ใช้งานได้กว้างขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ (พงษ์ธร แซ่ฮุย, 2547)

น้ำยางสดที่ได้หลังจากกรีดยางแล้วจะคงสภาพเป็นน้ำยางอยู่ได้เพียงช่วงระยะเวลาหนึ่งคือ ไม่เกิน 3-6 ชั่วโมง จากนั้น น้ำยางจะเริ่มจับตัวและมีความหนืดที่เพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งน้ำยางพาราเกิดการสูญเสียสภาพ ซึ่งอาจเกิดมาจากสภาพแวดล้อม อุณหภูมิ การเจริญเติบโตของแบคทีเรียในน้ำยางพาราหรือเมื่อค่า pH ของน้ำยางลดลงต่ำกว่า 6.5 จะมีสถานะเป็นต่าง หากไม่มีการเติมสารเคมีเพื่อรักษาสภาพลงไปในน้ำยางพารา (เสาวณีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี, 2547)

พงษ์ธร แซ่ฮุย (2547) กล่าวถึงสมบัติของน้ำยางพาราว่ามีลักษณะเด่น คือ ความยืดหยุ่น (Elasticity) โดยน้ำยางพาราที่มีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำ แล้วแรงกระทำหมดไป ลักษณะของยางพาราก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้แล้วยางพารายังมีสมบัติที่เยี่ยมด้านการเหนียวติดกัน (Tack) ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญของการผลิตวัสดุ

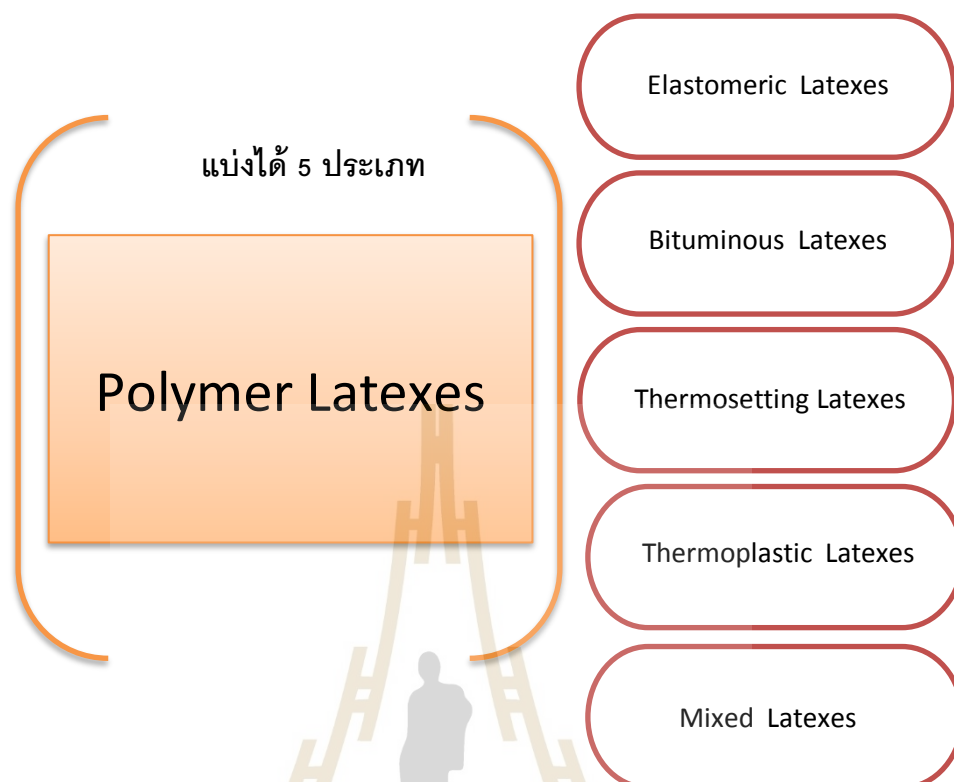
อุปกรณ์ เครื่องใช้ หรือผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น

อย่างไรก็ตามยางพาราอาจเกิดการเสื่อมสภาพได้เร็ว ภายใต้แสงแดดและความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางพารามีพันธะคู่ (Double bond) อยู่มากมาย ทำให้ยางพารามีความไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซน โดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น ในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิดเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ เพื่อยืดอายุการใช้งาน

2.4 การใช้น้ำยางพาราผสมในงานคอนกรีต

ในปัจจุบันมีการนำน้ำยางพารามาใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างมากขึ้น Walters (1987) จำแนกน้ำยางพาราที่สามารถนำมาใช้ในการผสมคอนกรีต แบ่งได้เป็น 5 ประเภท แสดงในรูปที่ 2.4 โดยมีการศึกษาและนำมาประยุกต์เพื่อใช้ทำเป็นคอนกรีตผสมน้ำยางพารา Neville (1990) พบว่าน้ำยางที่ใช้อยู่ในรูปการสังเคราะห์ ซึ่งมีการเปรียบเทียบสมบัติของคอนกรีตธรรมดา กับคอนกรีตผสมน้ำยาง สรุปได้ว่าคอนกรีตผสมน้ำยางพารา มีความสามารถในการรับแรงดึงและแรงอัดที่สูงขึ้น เพราะทำให้น้ำซึมผ่านได้ยากขึ้น มีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี สามารถยึดเกาะกับคอนกรีตได้อย่างเหมาะสม





รูปที่ 2.4 นํ้ายางพาราที่สามารถนำมาใช้ในการผสมคอนกรีต (ดัดแปลงจาก Walters, 1987)

Ohama (1987) อธิบายการก่อตัวของคอนกรีตผสมนํ้ายางพาราไว้ว่า นํ้ายางพาราที่ใช้ผสมจะอยู่ใน รูปของสารแขวนลอย (Emulsion) โดยมีอนุภาคของโพลิเมอร์ (Polymer) ซึ่งเมื่อผสมนํ้ายางพารามาผสมเข้ากับคอนกรีตแล้ว จะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้น 2 ส่วน คือ 1.ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) โดยเกิดจากซีเมนต์ผสมกับนํ้า และ 2.ปฏิกิริยาการก่อตัวเป็นฟิล์ม (Film) ที่เกิดจากอนุภาคของโพลิเมอร์มารวมตัวกัน (Coalesce) ซึ่งเป็นการก่อตัวของชั้นฟิล์มเสมือนเป็นเนื้อเดียวกันกับคอนกรีต ทำหน้าที่เป็นวัสดุประสาน หรือยึดเกาะ(Binder) ระหว่างมวลรวมเข้าด้วยกัน และสามารถรับแรงดึงกับกำลังอัดได้มากขึ้น เพราะเกิดความเหนียวและมีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี สามารถยึดเกาะกับคอนกรีตได้อย่างเหมาะสม เพราะในนํ้ายางพารา ส่วนใหญ่จะเป็นของเหลวอยู่ในรูป Emulsion มีอนุภาคของโพลิเมอร์ (Polymer) แขวนลอยอยู่ โดยต้องมีปริมาณนํ้ายางพาราที่เหมาะสมในการผสมกับคอนกรีต

Mindess et al., (2002) กล่าวว่ากลไกการซึมผ่านของคอนกรีตคือการซึมของสารผ่านรูพรุนหรือรอยร้าวในเนื้อซีเมนต์เพสต์โดยปกติในเนื้อซีเมนต์เพสต์จะมีรูพรุน 2 ประเภทเป็นหลักคือรูพรุนขนาดใหญ่ที่เรียกว่าช่องว่างคาร์ปิลารี (Capillary Pore) และรูพรุนขนาดเล็กที่เรียกว่า

ช่องว่างในเจล (Gel Pore) การซึมผ่านจะเกิดโดยการซึมผ่านรูพรุนขนาดใหญ่ในเนื้อซีเมนต์เพสต์เป็นหลักมากกว่าการซึมผ่านรูพรุนขนาดเล็กซึ่งรูพรุนขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นมากหรือน้อยนั้นจะแปรผันตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่ารูพรุนขนาดใหญ่จะมากขึ้น ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนที่ค่าอัตราส่วน w/c มากกว่า 0.42 นอกจากนั้น ค่าอัตรา w/c ที่ลดลงและทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น นอกจากนี้ ยังมีผลทำให้ความสามารถในการต้านทานรอยร้าวที่อาจเกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นด้วย จึงเป็นผลดีต่อความคงทนของคอนกรีตเช่นกัน

จากที่ได้กล่าวมาความพรุนในเนื้อคอนกรีตจะเกิดขึ้นในส่วนของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นความสามารถในการซึมผ่านของคอนกรีตจึงขึ้นอยู่กับสมบัติของซีเมนต์เพสต์เป็นสำคัญ อาจเกิดได้มากขึ้นหากบริเวณผิวสัมผัสระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมในเนื้อคอนกรีตเกิดรอยร้าวขึ้นในการก่อสร้างส่วนใหญ่จะพิจารณาถึงการซึมผ่านของน้ำเป็นหลักซึ่งมีผลกระทบต่อความคงทนของโครงสร้างโดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องใช้ในการเก็บน้ำ เป็นต้น

2.5 ส่วนผสมของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา

Ohama (1984) ในการทำส่วนผสมของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา จะต้องใช้น้ำยางพาราในปริมาณที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับสารเคมีผสมคอนกรีต (Chemical Admixture) อื่น ๆ เช่น สารลดน้ำ (Water Reducing Agent) ซึ่งการใช้ปริมาณน้ำยางพาราที่มากเกินไปจะส่งผลให้ต้นทุนของ คอนกรีตผสมน้ำยางพารา (Latex Modified Concrete, LMC) หรือ มอร์ต้าผสมน้ำยางพารา (Latex Modified Mortar, LMM) สูงเกินไป ทำให้กำลังอัดลดลงได้ นอกจากนี้สมบัติของหินและทรายก็มีความจำเป็นเช่นเดียวกัน ในการทำส่วนผสมของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา เพราะจะต้องมีอัตราส่วนที่เหมาะสมซึ่งมีความแตกต่างจากการทำคอนกรีตธรรมดาทั่วไป เนื่องจากเกิดแรงตึงผิว (Surfactant) ของน้ำยางพาราที่เติมลงไปคอนกรีตจะทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กก็กระจายอยู่ใน LMM หรือ LMC ดังนั้นจึงไม่ควรใช้สารกักกระจายฟองอากาศ หรือ Air Entraining Admixture ร่วมกับน้ำยางพารา เพราะน้ำยางพาราทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กก็กระจายอยู่ในส่วนผสม ซึ่งฟองอากาศเหล่านี้ ทำหน้าที่เสมือนมวลรวมละเอียดขนาดเล็ก มีความยืดหยุ่นที่ดี โดยอนุภาคของ โพลีเมอร์ (Polymer) ในน้ำยางพารามีรูปร่างเป็นทรงกลม (Sphere) จึงช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างของแข็งภายในโครงสร้าง LMM และ LMC

Neville (1990) อธิบายถึงสมบัติด้านกำลังคอนกรีตผสมน้ำยางพารา (Latex Modified Concrete, LMC) หรือ มอร์ต้าผสมน้ำยางพารา (Latex Modified Mortar, LMM) โดยองค์ประกอบที่สำคัญ มี 2 ประการ ดังนี้

1) อัตราส่วนของของแข็ง (Solid) ทั้งหมดในน้ำยาพาราต่อซีเมนต์ โดยน้ำหนัก (P/C) ในการผสมโดยทั่วไปของ LMM หรือ LMC ที่มี P/C สูงจะทำให้ค่ากำลังต่าง ๆ เช่น Tensile Strength, Flexural Strength เป็นต้น สูงกว่าการผสมคอนกรีตแบบธรรมดา

2) วิธีการบ่มสำหรับคอนกรีตผสมน้ำยาพารา ต้องทำการบ่มแห้งหรือบ่มในอากาศเท่านั้น เพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นหรือน้ำเข้าไปในเนื้อของส่วนผสม การบ่มแห้งจะทำให้เกิดการระเหยของอนุภาค Polymer ในน้ำยาพาราออกไปได้โดยเร็ว จึงจะทำให้เกิดเกาะรวมตัวกัน ก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มที่ต่อเนื่องแทรกกระจายป่นอยู่ในเนื้อ ของคอนกรีต สำหรับการบ่มขึ้นเพื่อให้ปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์ ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปเพื่อที่จะให้ได้ LMM และ LMC ที่มีคุณภาพดี จึงต้องใช้วิธีบ่มทั้ง 2 แบบ

2.6 สมบัติเชิงกลของคอนกรีต

สมบัติทางวิศวกรรมหรือสมบัติทางกลของคอนกรีต โดยไปทั่วมีการทดสอบค่าต่าง ๆ แตกต่างกันไป เพื่อให้เหมาะกับการทำงานประเภทนั้น ๆ ซึ่งในการทดสอบสมบัติทางกลของคอนกรีตผสมน้ำยาพารา มีดังนี้

1) กำลังอัด (Compressive Strength) เป็นสมบัติที่สำคัญที่สุดของคอนกรีต ทั่วไปนิยมทำการทดสอบหาลำดับยึดเหนี่ยว เช่น กำลังต้านทานแรงอัด เป็นต้น การทดสอบหาลำดับต้านทานแรงอัดของคอนกรีตทำได้โดยการกดหรืออัดแท่งทดสอบรูปลูกบาศก์ตามมาตรฐานอังกฤษ หรือรูปทรงกระบอกตามมาตรฐานอเมริกัน ซึ่งบ่มขึ้นตามระยะเวลาที่กำหนด แล้วทำการคำนวณหาค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยมีหน่วยเป็น กก./ตร.ซม หรือ ปอนด์/ตร.นิ้ว ซึ่งการทดสอบแรงอัด (compression) เป็นการทดสอบที่มีลักษณะการทดสอบคล้ายกับการทดสอบแรงดึง แต่ต่างกันที่ลักษณะของแรงที่ใช้ในการทดสอบจะเกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อสร้างแรงอัดให้เกิดขึ้นในชิ้นงาน โดยทั่วไปลักษณะของชิ้นงานทดสอบจะถูกตัดเป็น 4 แบบ ได้แก่ ปริซึมหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ปริซึมหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ทรงกระบอกตัน และท่อทรงกระบอก

2) กำลังดัด (Flexural strength) การทดสอบแรงดึงจะประกอบด้วยแรง 2 แรงด้วยกัน โดยเป็นวิธีการทดสอบที่ใช้ประมาณค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุ ซึ่งในบางครั้งใช้เป็นการทดสอบแบบทดแทนการทดสอบแรงดึงในกรณีที่ชิ้นงานตัวอย่างอาจมีขนาดใหญ่ไม่พอในการทดสอบแรงดึง จึงใช้การทดสอบแรงดัดทดแทน แต่ค่อยไม่นิยมเท่าไรนัก ซึ่งในการทดสอบแรงดึงนั้นชิ้นงานทดสอบจะได้รับแรงดึงที่เท่ากันตลอดพื้นที่หน้าตัด แต่ในการทดสอบแรงดัดชิ้นงานทดสอบจะได้รับแรงดึงไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด เนื่องจากเมื่อทำการทดสอบไปชิ้นงานจะมีการดัดงอเพิ่มขึ้น จึงไม่เหมาะกับการทดสอบวัสดุที่อ่อนตัวง่าย

- 3) โมดูลัส (modulus) เป็นค่าแสดงความต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำ สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียด
- 4) อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (water – cement ratio) น้ำหนักน้ำกับน้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมคอนกรีต อัตราส่วนที่ต่ำกว่าจะทำให้เกิดความแข็งแรงและความทนทานที่สูงขึ้น แต่รูปแบบในการทำงานอาจมีความยากสำหรับการทำส่วนผสม
- 5) ความพรุน เป็นอิทธิพลของ w/c ratio ที่มีต่อค่าการซึมผ่านของคอนกรีต

2.7 การวิเคราะห์โครงสร้างแบบจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างแบบจุลภาค คือ สภาพหรือลักษณะของพื้นผิวที่ปรากฏของชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมเพื่อการตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ณ กำลังขยายสูงกว่า 25 เท่า ในทางปฏิบัติโดยมีการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy : SEM), การวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer : EDS), เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffract meter : XRD) และเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzer) รายละเอียดของเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างแบบจุลภาค มีดังนี้

- 1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy : SEM) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยาย 6 -1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร สามารถถ่ายภาพตัวอย่างได้หลากหลายโดยไม่มีความจำเป็นต้องเคลือบผิวด้วยสารตัวนำไฟฟ้าก่อนการถ่ายภาพ โดยเลือกกระบวนสุญญากาศในห้องใส่ตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างแต่ละประเภท ได้แก่ ระบบสุญญากาศระดับสูง (High Vacuum) สำหรับตัวอย่างประเภทเป็นของแข็ง แข็ง และนำไฟฟ้า เช่น โลหะ เป็นต้น ระบบสุญญากาศระดับต่ำ (Low Vacuum) สำหรับตัวอย่างประเภทเป็นของแข็ง แข็ง และไม่นำไฟฟ้าเช่น พอลิเมอร์ ยาง เป็นต้น มีการทำงานโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM จะเป็นภาพถ่ายที่มีลักษณะแบบ 3 มิติ ดังนั้น เครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะ และวัสดุ เป็นต้น

- 2) เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์จาก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยการวิเคราะห์หาธาตุในตัวอย่าง ตั้งแต่ธาตุ B โบรอน ถึง U ยูเรเนียม วิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณ และสามารถวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุนบนพื้นผิวตัวอย่างที่ศึกษาได้ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่าง ขณะปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ มีแนวทางตัวอย่างชนิดควบคุมอุณหภูมิสูง ตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง

1,400 องศาเซลเซียส และแทนวางตัวอย่างชนิดควบคุมอุณหภูมิต่ำ ควบคุมได้ในช่วง -20 ถึง 60 องศาเซลเซียส จึงสามารถถ่าย VDO เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างขณะปรับอุณหภูมิที่ต้องการได้ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่าง ขณะปรับแรงดึง มีชุดแทนวิเคราะห์ทางกลของตัวอย่างด้วยเทคนิคแรงดึงขนาด 450 นิวตัน รองรับตัวอย่างได้สูงสุดที่ 1x12x65 mm มีระยะ Max Strain Travel 31 mm จึงสามารถถ่าย VDO เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงตัวอย่างขณะใส่แรงดึงได้ การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและส่องกราด (Scanning transmission electron microscopy :STEM) เป็นการวัดตัวอย่างที่เตรียมให้บาง เพื่อให้เห็นโครงสร้างที่ส่องผ่าน เพื่อให้วัดผลได้คล้ายกับ TEM สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่นการศึกษาเฟสที่ผสม รูปทรงการกระจายตัวของโลหะในพอลิเมอร์ตัวอย่างทางชีวภาพ เป็นต้น

3) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffract meter : XRD) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เป็นเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน หรือ เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ที่นำรังสีเอ็กซ์ (X-ray) มาใช้วิเคราะห์และระบุชนิดสารประกอบ โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน และสะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ กัน โดยมีหัววัดสัญญาณ (Detector) เป็นตัวรับข้อมูลองค์ประกอบและโครงสร้างของสารจะมีองค์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ในมุมที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นกับองค์ประกอบ รูปร่าง และลักษณะผลึกซึ่งผลที่ได้จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้นอกจากนั้น แล้วยังสามารถศึกษาและวิเคราะห์ ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง และเมื่อวิเคราะห์กับอุปกรณ์เสริม เช่น อุปกรณ์ให้ความเย็น-ร้อน ก็จะสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในขณะที่สภาวะทดสอบเปลี่ยนไป

4) เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzer) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและการกระจายของ รูพรุน ปริมาตรของรูพรุน ในแบบต่าง ๆ ด้วยวิธีให้ตัวอย่างมีการดูดซับหรือคายก๊าซ เพื่อวิเคราะห์หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน พื้นที่ผิวของผงตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Volumetric gas adsorption method เช่น N₂, Ar₂, CO₂, H₂ และก๊าซไม่ก่ดกร่อนอื่น ๆ สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้พร้อมกันไม่เกิน 3 ตัวอย่างและเป็นอิสระจากกันซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ถูกต้องแม่นยำขึ้น ซึ่งมีการใช้วิธีวิเคราะห์แบบ AFMS ซึ่งจะช่วยให้ผลวิเคราะห์มีความแม่นยำสูงและสามารถทำการวิเคราะห์ข้อมูลซ้ำได้ สามารถใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการวิจัย การศึกษาและการควบคุมคุณภาพในอุตสาหกรรม รวมถึงความจำเพาะทางเคมีของของแข็ง ได้แก่ การกระจายของโลหะ (Metal

Dispersion) และโลหะกัมมันต์ (Active Metal) บนพื้นผิวของของแข็ง โดยใช้เทคนิคการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และเทคนิคการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ด้วยหลักการวัดปริมาตรของแก๊สในสถานะสูญญากาศ ณ ความดันคงที่ (Vacuum volumetric technique)



รูปที่ 2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy : SEM)
(สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน)



รูปที่ 2.6 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffract meter : XRD)
(สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน)



รูปที่ 2.7 เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและความพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzer)
(กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

การศึกษานี้มุ่งเน้นทำการศึกษาศสมบัติทางวิศวกรรมและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด กำลังดัด ความพรุน และความทนทานต่อโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตปรับปรุงด้วยยางพารากับอัตราส่วนเนื้อเยื่อต่อปริมาณปูนซีเมนต์ โดยตัวอย่างคอนกรีตที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ และกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) รวมถึงระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต ทั้งนี้ จะทำการศึกษาโครงสร้างภายในของคอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา โดยวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างแบบจุลภาค (Microstructure analysis) แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลการทดสอบต่อไป

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างแบบจุลภาค เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและกำลังดัดของคอนกรีตผสมยางพารากับอัตราส่วนเนื้อเยื่อต่อปริมาณปูนซีเมนต์ เมื่อมีการเติมน้ำยางพาราที่มากขึ้น จะมีผลทำให้กำลังอัดลดลง และ กำลังดัดเพิ่มขึ้น โดยมีเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), การวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS), เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และเครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและความพรุน

โดยแนวทางการศึกษาวิจัยเป็นแบ่ง 2 ส่วนคือ (1) การศึกษาศสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา โดยการนำตัวอย่างคอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยางพารามาทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength, CS) และทดสอบกำลังดัด (Flexural Strength, FS) พร้อมทั้งการวิเคราะห์ค่ากำลังอัดและค่ากำลังดัดของคอนกรีตปรับปรุงด้วยยางพารากับอัตราส่วนเนื้อเยื่อต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (2) การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา โดยการวิเคราะห์โครงสร้างแบบจุลภาค คือ ศึกษาความสัมพันธ์ของผลการทดลองที่ได้ และลักษณะของพื้นผิวของคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา

สำหรับอัตราส่วนผสมและจำนวนตัวอย่างทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.1 โดยรายละเอียดแต่ละขั้นตอนของการทดสอบจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมและจำนวนตัวอย่างทดสอบของงานในส่วนที่ 1 และ ส่วนที่ 2

การทดสอบ	w/c	ปริมาณ เนื้อยางต่อ ปริมาณ ปูนซีเมนต์	อายุบ่ม (วัน)	อัตราส่วน ความเค้น (%)	ระยะเวลาใน การแช่ ตัวอย่าง สำหรับการ ทดสอบ ความ ทนทาน (วัน)	จำนวน ตัวอย่าง ทดสอบต่อ หนึ่งอัตรา ส่วนผสม (ตัวอย่าง)	รวมจำนวน ตัวอย่าง ทดสอบ ทั้งหมด (ตัวอย่าง)
1. สมบัติของคอนกรีต สด	0.3, 0.4, 0.5	0, 0.58, 1.16, 1.73, 2.31, 2.89, 3.47, 4.63, 5.78	7, 14, 28	-	-	3	243
2. กำลังอัด	0.3, 0.4, 0.5	0, 0.58, 1.16, 1.73, 2.31, 2.89, 3.47, 4.63, 5.78	7, 14, 28	-	-	3	243
3. กำลังดัด	0.3, 0.4, 0.5	0, 0.58, 1.16, 1.73, 2.31, 2.89, 3.47, 4.63, 5.78	7, 14, 28	-	-	3	243
4. ความต้านทาน ความล้า	0.3, 0.4, 0.5	0, 0.58, 1.16, 1.73, 2.31, 2.89, 3.47, 4.63, 5.78	28	60, 80, 90	-	3	243
5. กำลังอัด (ทนทานต่อซัลเฟต)	0.3, 0.4, 0.5	0, 0.58, 1.16, 1.73, 2.31, 2.89, 3.47, 4.63, 5.78	28	-	0, 7, 30, 60, 120	3	405
6. กำลังดัด (ทนทานต่อซัลเฟต)	0.3, 0.4, 0.5	0, 0.58, 1.16, 1.73, 2.31, 2.89, 3.47, 4.63, 5.78	28	-	0, 7, 30, 60, 120	3	405
7. ความต้านทานต่อ ความล้า (ทนทานต่อ ซัลเฟต)	0.3, 0.4, 0.5	0, 0.58, 1.16, 1.73, 2.31, 2.89, 3.47, 4.63, 5.78	28	60, 80, 90	0, 7, 30, 60, 120	3	1,215

3.2 วัสดุดิบและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1.1 ตัวอย่างคอนกรีตปรับปรุงด้วยยางพารา

3.2.1.2 คอนกรีตที่ทำการทดสอบจะใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 และมีสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 และการเตรียมคอนกรีตต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C192 โดยใช้เครื่องผสมคอนกรีตแบบหมุน ควบคุมค่าการยุบตัว (Slump) ของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 10-30, 20-50 และ 30-70 มิลลิเมตร โดยการแปรผันปริมาณน้ำยาผสมคอนกรีตอัตราส่วน w/c ในการวิจัยเท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5

3.2.1.3 วัสดุมวลรวมละเอียดและวัสดุมวลรวมหยาบที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตมีสมบัติตามข้อกำหนดที่ ทล.-ก201 และ ทล.-ก202 ของกรมทางหลวง ตามลำดับ โดยใช้ทรายน้ำจืด และ หินย่อยที่ต้องไม่ด้วยเครื่องจักร มีลักษณะรูปร่างเหลี่ยมค่อนข้างกลม ให้เป็นไปตามคุณสมบัติตามมาตรฐานวัสดุของ มอก.

3.2.1.4 สารผสมเพิ่มใช้น้ำยาผสมคอนกรีต ประเภท F (Type F superplasticizer)

3.2.1.5 น้ำยางพารา โดยใช้ปริมาณน้ำยางชั้น ที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC ร้อยละ 52.04)

3.2.1.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM) ที่มีกำลังขยาย 6 -1,000,000 เท่า

3.2.1.7 เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS) โดยการใช้วิเคราะห์หาธาตุในตัวอย่าง ตั้งแต่ธาตุโบรอน (B) ถึง ธาตุยูเรเนียม (U) และสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative)

3.2.1.8 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffract meter: XRD) โดยการนำรังสีเอ็กซ์ (X-ray) มาใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกและระบุชนิดสารประกอบที่มีอยู่ในตัวอย่าง ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative)

3.2.1.9 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzer) โดยใช้เทคนิคการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และเทคนิคการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ด้วยหลักการวัดปริมาตรของแก๊สในสถานะสูญญากาศ ณ ความดันคงที่ ซึ่งมีการใช้วิธีวิเคราะห์แบบ

AFSM ซึ่งจะช่วยให้ผลวิเคราะห์มีความแม่นยำสูงและสามารถทำการวิเคราะห์ข้อมูลซ้ำได้ สามารถใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการวิจัย การศึกษาและการควบคุมคุณภาพในอุตสาหกรรม รวมถึงความจำเพาะทางเคมีของของแข็ง ได้แก่ การกระจายของโลหะ และโลหะกัมมันต์ บนพื้นผิวของของแข็ง

3.3 อัตราส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตผสมน้ำยารพารา

ตัวอย่างคอนกรีตผสมน้ำยารพาราที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ปริมาณน้ำยารพาราชั้น ที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC ร้อยละ 52.04) ร้อยละ 0, 0.58, 1.16, 1.73, 2.31, 2.89, 3.47, 4.63 และ 5.78 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 โดยการทดสอบและเก็บข้อมูล แบ่งเป็น 2 ส่วน ตามระยะเวลาของอายุบ่ม คือ ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน (ส่วนที่ 1) เป็นการทดสอบสมบัติของคอนกรีตสด, การทดสอบกำลังอัด, และการทดสอบกำลังดัด และที่อายุบ่ม 28, 60, 80, และ 90 วัน (ส่วนที่ 2) เป็นการทดสอบความต้านทานความล้า การทดสอบกำลังอัด(ทนทานต่อซัลเฟต), การทดสอบกำลังดัด(ทนทานต่อซัลเฟต) และการทดสอบความต้านทานต่อความล้า(ทนทานต่อซัลเฟต)

สำหรับตัวอย่างคอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยารพาราที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติทางกลของคอนกรีต โดยมีรายการแสดงรายละเอียดอัตราส่วน w/c, ปริมาณ r/c, อายุบ่ม (วัน), อัตราส่วนความเค้น(ร้อยละ), ระยะเวลาในการแช่ตัวอย่างสำหรับการทดสอบความทนทาน (วัน), และจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบดังตารางที่ 3.1

3.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

- 3.4.1 เลือกหัวข้อที่จะทำการวิจัย (Selecting a topic) เป็นขั้นตอนแรกของการวิจัย เพื่อจะต้องรู้ว่าจะทำเรื่องอะไร อาจเกิดจากความอยากรู้ ความสงสัย การศึกษาค้นคว้า การสนทนากับการทำงาน หรืออาจเกิดจากสภาพแวดล้อมทั่ว ๆ ไป เป็นต้น
- 3.4.2 ศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้อง (Review of literature) หลังจากกำหนดเรื่องที่จะวิจัย จะต้องศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย โดยศึกษาสาระความรู้ แนวความคิด ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องนั้น ในตำรา หนังสือวารสาร งานวิจัย และผลงานวิจัย ซึ่งจะช่วยให้ทราบว่าจะมีวิธีดำเนินการอย่างไร ซึ่งจะทำให้ผู้วิจัยมีความชัดเจนในเรื่องที่จะทำวิจัยมากขึ้น
- 3.4.3 การออกแบบการวิจัย (Research design) เพื่อแนวทางในการดำเนินการวิจัย เพื่อให้ตอบปัญหาวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุดวางแผนภายใต้กรอบการวิจัย

- 3.4.4 สร้างเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล (Instruction) ดำเนินการสร้างตามหลักและขั้นตอนการสร้างเครื่องมือประเภทนั้น ๆ ซึ่งจะต้องศึกษาวิธีการใช้เครื่อง การทดลองและตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือ การปรับปรุงเครื่องมือ เป็นต้น
- 3.4.5 การเลือกกลุ่มตัวอย่าง (Sampling) สำหรับกรณีศึกษาในครั้งนี้ จะใช้ตัวอย่างคอนกรีตผสมน้ำยาพาราเป็นกลุ่มตัวอย่างในการทำงานวิจัย
- 3.4.6 การรวบรวมข้อมูล เช่น การเก็บข้อมูลเพื่อนำกำหนดไว้ในรูปแบบของการวิจัย
 - 3.4.6.1 การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength) ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 303-2545 เทียบเท่ากับมาตรฐาน AASHTO T.207 และ T.208
 - 3.4.6.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D1632 และ D1635
 - 3.4.6.3 การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค ผลที่ได้เป็นรูปภาพแสดงลักษณะของพื้นผิวที่ปรากฏของชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมเพื่อการตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ โดยมีการ วิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS), เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD), และ เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและความพรุน
- 3.4.7 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis) เป็นขั้นตอนที่ต่อจากขั้นการรวบรวมข้อมูล เมื่อผู้วิจัยรวบรวมข้อมูลมาแล้วก็นำมาคัดเลือกข้อมูลที่มีความสมบูรณ์ แล้วนำมาวิเคราะห์ ซึ่งอาจจะวิเคราะห์ด้วยมือหรือวิเคราะห์ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ก็ได้ผลเช่นเดียวกันการ
 - 3.4.7.1 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและกำลังดัดของคอนกรีตปรับปรุงด้วยยาพารากับอัตราส่วนเนื้อยาต่อปริมาณปูนซีเมนต์
 - 3.4.7.2 การวิเคราะห์ความพรุน จากการวิเคราะห์พื้นผิวและความพรุน
 - 3.4.7.3 การวิเคราะห์ความทนทานต่อโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตปรับปรุงด้วยยาพารากับอัตราส่วนเนื้อยาต่อปริมาณปูนซีเมนต์ จากภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค
- 3.4.8 การแปลความหมายหรือการตีความข้อมูล (Interpretation)
- 3.4.9 สรุปผลการศึกษา

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัยและวิเคราะห์ผล

4.1 สมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด และน้ำยาพารา

4.1.1 ปูนซีเมนต์

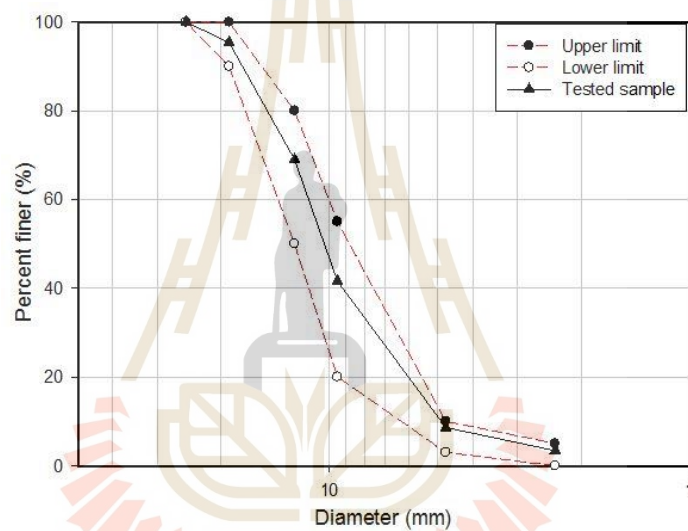
การทำคอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยาพาราในงานวิจัยนี้ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง งานโครงสร้าง เอสซีจี สีแดง ผลิตตาม มอก.15 เล่ม 1-2547 ถือได้ว่าเป็นมาตรฐานทั่วไปในงานก่อสร้างคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ตามมาตรฐานอเมริกัน ASTM C-150 TYPE 1

ตารางที่ 4.1 เกณฑ์กำหนดสมบัติพื้นฐานเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ตามมาตรฐานอเมริกัน ASTM C-150 TYPE 1 ที่ผลิตตาม มอก. 15 เล่ม 1-2555

เกณฑ์กำหนดสมบัติทางเคมี	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง		
	มอก.15 เล่ม 1-2547 ประเภทหนึ่ง	มาตรฐาน ASTM C-150 TYPE 1	ปูนซีเมนต์ที่พีไอ (สีแดง)
มักเนเซียออกไซด์ (MgO) สูงสุดร้อยละ	6.0	6.0	1.2
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)			
เมื่อมี 3 CaO.Al ₂ O ₃ ร้อยละ 8 หรือน้อยกว่า สูงสุดร้อยละ	3.0	3.0	2.5
เมื่อมี 3 CaO.Al ₂ O ₃ มากกว่าร้อยละ 8 สูงสุดร้อยละ	3.5	3.5	-
เกณฑ์กำหนดสมบัติทางเคมี	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง		
	มอก.15 เล่ม 1-2547 ประเภทหนึ่ง	มาตรฐาน ASTM C-150 TYPE 1	ปูนซีเมนต์ที่พีไอ (สีแดง)
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา สูงสุดร้อยละ	3.0	3.0	1.1
กากที่ไม่ละลายในกรดต่าง สูงสุดร้อยละ	0.75	0.75	0.30
ไตรคัลเซียมซิลิเกต (3CaO.SiO ₂) สูงสุดร้อยละ	-	-	58
ไตรคัลเซียมอลูมิเนต (3CaO.Al ₂ O ₃) สูงสุดร้อยละ	-	-	8
Total Alkalies (Na ₂ O + 0.658 K ₂ O) สูงสุดร้อยละ	0.6	0.6	0.4

4.1.2 มวลรวมหยาบ

สำหรับสมบัติพื้นฐานมวลรวมหยาบ โดยการทดสอบค่าความสึกหรอ ค่าดัชนีความแบนและดัชนีความยาว พบว่า มีค่า ร้อยละ 39.83 ร้อยละ 28.73 และ 21.16 ตามลำดับ ในส่วนของผลการทดสอบหาขนาดคละของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงการกระจายขนาดคละที่ดี นอกจากนี้ สำหรับการทดสอบ ค่าความคงทน ค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของวัสดุ มีค่า เท่ากับ ร้อยละ 3.84 ร้อยละ 2.76 และ 0.27 ตามลำดับ โดยจากผลการทดสอบทั้งหมดพบว่าวัสดุมวลรวมหยาบที่นำมาใช้ทดสอบมีค่าผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานกรมทางหลวงข้อกำหนดที่ ทล.- ก. 202/2544 ดังแสดงในตารางที่ 4.2



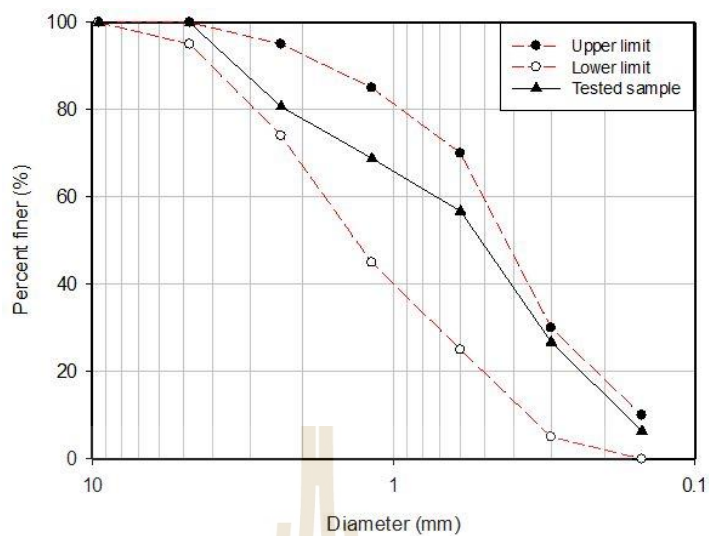
รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดคละของมวลรวมหยาบ

ตารางที่ 4.2 ผลทดสอบสมบัติพื้นฐานของมวลรวมหยาบ ตามข้อกำหนดที่ ทล.- ก. 202/2544

มาตรฐาน กรมทาง	ชนิดการทดสอบ	ค่าที่ มาตรฐาน กำหนด	ผลการทดสอบ
ทล.-ท. 202	การทดสอบหาความสึกหรอของ Coarse aggregate โดยใช้เครื่อง “Los Angeles Abrasion”	≤ 40.00 %	39.83 %
ทล.-ท. 210	วิธีการทดสอบหาค่าดัชนีความแบน (Flakiness index)	≤ 35 %	28.73%
ทล.-ท. 211	วิธีการทดสอบหาค่าดัชนีความยาว (Elongation index)	≤ 35 %	21.16%
ทล.-ท 213	วิธีการทดสอบหาค่าความคงทน (Soundness) ของมวลรวมจำนวน 5 รอบ	Na ₂ SO ₄ < 12%	3.84%
ทล.-ท. 201	วิธีการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะวัสดุเม็ดหยาบ	ค่าการดูดซึมน้ำ ≤ 5 %	ความถ่วงจำเพาะมวลรวมหยาบแห้ง = 2.78 ความถ่วงจำเพาะที่ปรากฏ = 2.76 การดูดซึมน้ำ = 0.27

4.1.3 มวลรวมละเอียด

สำหรับสมบัติพื้นฐานของมวลรวมละเอียด โดยการทดสอบค่าความคงทน พบว่า มีค่าร้อยละ 8.25 โดยที่ Organic impurities อยู่ในระดับสีที่ 1 ในส่วนของผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของวัสดุชนิดเม็ดละเอียด มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 2.65 และ 5.12 ตามลำดับ และขนาดคละของวัสดุซึ่งทดสอบผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงการกระจายขนาดคละที่ดี นอกจากนี้จากผลการทดสอบ Fineness modulus มีค่าเท่ากับ 2.61 โดยจากผลการทดสอบทั้งหมดพบว่า วัสดุมวลรวมละเอียดที่นำมาใช้ทดสอบมีค่าผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานกรมทางหลวงข้อกำหนดที่ ทล.- ก. 201/2544 ดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดคละของมวลรวมละเอียด

ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบสมบัติพื้นฐานมวลรวมละเอียดข้อกำหนดที่ ทล.- ก. 201/2544

มาตรฐาน กรมทาง	ชนิดการทดสอบ	ค่าที่มาตรฐาน กำหนด	ผลการทดสอบ
ทล.-ท. 213	วิธีการทดลองหาค่าความคงทน ของ มวลรวมจำนวน 5 รอบ	$\text{Na}_2\text{SO}_4 < 12\%$	8.52%
ทล.-ท. 207	วิธีการทดลองหา Organic impurities ในทรายสำหรับคอนกรีต	แอมสีต้องไม่เข้มกว่า สีมาตรฐาน (ระดับสีที่ 3)	ระดับสีที่ 1
ทล.-ท. 209	วิธีการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะ และการดูดซึมน้ำของวัสดุชนิดเม็ด ละเอียด	ค่าการดูดซึมน้ำ 2.0 – 8.0 %	ความถ่วงจำเพาะมวลรวมหยาบแห้ง = 3.06 ความถ่วงจำเพาะที่ปรากฏ = 2.65 การดูดซึมน้ำ = 5.12 %
ทล.-ท. 205	วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดย ผ่านตะแกรงแบบล่าง วัสดุมวล รวมละเอียดต้องมีค่า Fineness modulus (F.M.)	ไม่น้อยกว่า 2.3 และไม่มากกว่า 3.1	2.61

4.1.4 น้ำยางพารา

ในงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณน้ำยางชั้น ที่มีปริมาณเนื้อยาง ร้อยละ 0, 0.58, 1.16, 1.73, 2.31, 2.89, 3.47, 4.63 และ 5.78 ในธรรมชาติการนำน้ำยางสดที่ได้หลังจากกรีดต้นยางแล้วจะคงสภาพเป็นน้ำยางอยู่ได้เพียงช่วงระยะเวลาหนึ่ง จากนั้น น้ำยางจะเริ่มจับตัวและมีความหนืดที่เพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งน้ำยางพาราเกิดการสูญเสียสภาพ หรือเมื่อค่า pH ของน้ำยางลดลงต่ำกว่า 6.5 จะมีสถานะเป็นต่าง หากไม่มีการเติมสารเคมีเพื่อรักษาสภาพลงไปน้ำยางพาราโดยผลทดสอบน้ำยางพารา ดังแสดงรายละเอียดใน ตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบน้ำยางพารา

รายการทดสอบ	ชื่อตัวอย่าง	วิธีการทดสอบ
	น้ำยางพารา	
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TSC), ร้อยละต่อน้ำหนัก	55.11	ISO 124:2014
ปริมาณเนื้อยางแห้ง (DRC), ร้อยละต่อน้ำหนัก	52.04	ISO 126:2005
ปริมาณความเป็นต่างในรูปของแอมโมเนีย (Ammonia content), ร้อยละต่อน้ำหนัก	0.69	ISO 125:2011
ค่ากรดไขมันที่ระเหยได้ (VFA number)	0.07	ISO 506:1992
ค่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH number)	0.66	ISO 127:2012
ค่าความเป็นกรด-ต่าง (pH of latex)	10.42	ISO 976:2013
ปริมาณส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non-rubber solids), ร้อยละต่อน้ำหนัก	3.07	-
ความคงตัวของน้ำยางต่อเครื่องมือกล (MST), นาที	124	ISO 35:2004
ปริมาณสลัดจ์ (Sludge content), ร้อยละต่อน้ำหนัก	2.612	ISO 2005:1992
ปริมาณยางจับเป็นก้อน (Coagulum content), ร้อยละต่อน้ำหนัก	0.012	ISO 706:2004
ปริมาณแมกนีเซียม (Mg^{2+} on solids), ppm	3861	-
ความถ่วงจำเพาะ ที่อุณหภูมิ 25°C	0.972	-
ความหนืด (Viscosity), ที่อุณหภูมิ 25°C โดยเครื่อง Brookfield Viscosity รุ่น LVT; Spindle No.2 Speed 60 rpm (cPs)	430	ISO 1652:2011

4.2 ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมและความทนทานต่อโซเดียมซัลเฟล

4.2.1 การออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีต

กำหนดสัดส่วนในปริมาตร 1:2:3 (ปูนซีเมนต์: ทราย: หิน) โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 สำหรับวัสดุมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบจะกำหนดให้ใช้ในสถานะอิมิตัวผิวแห้ง (SSD) และเตรียมตัวอย่างโดยใช้ปริมาณน้ำยาร Preblend ที่มีปริมาณเนื้อเยื่อต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (r/c) ร้อยละ 0, 0.58, 1.16, 1.73, 2.31, 2.89, 3.47, 4.63 และ 5.78 และอัตราส่วนน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 ดังแสดงใน ตารางที่ 4.5, 4.6 และ 4.7

ตารางที่ 4.5 อัตราส่วนผสม w/c = 0.3 ที่น้ำยารพาราปริมาณต่าง ๆ

r/c (%)	ปูน (kg.)	ทราย (kg.)	หิน (kg.)	น้ำ (kg.)	น้ำยาร (kg.)
0	50.00	103.57	155.36	15.00	0.00
0.58	50.00	103.57	155.36	14.73	0.56
1.16	50.00	103.57	155.36	14.47	1.11
1.73	50.00	103.57	155.36	14.20	1.66
2.31	50.00	103.57	155.36	13.94	2.22
2.89	50.00	103.57	155.36	13.67	2.78
3.47	50.00	103.57	155.36	13.40	3.33
4.63	50.00	103.57	155.36	12.87	4.45
5.78	50.00	103.57	155.36	12.34	5.55

ตารางที่ 4.6 อัตราส่วนผสม w/c = 0.4 ที่น้ำยารพาราปริมาณต่าง ๆ

r/c (%)	ปูน (kg.)	ทราย (kg.)	หิน (kg.)	น้ำ (kg.)	น้ำยาร (kg.)
0	50.00	103.57	155.36	20.00	0.00
0.58	50.00	103.57	155.36	19.73	0.56
1.16	50.00	103.57	155.36	19.47	1.11
1.73	50.00	103.57	155.36	19.20	1.66
2.31	50.00	103.57	155.36	18.94	2.22
2.89	50.00	103.57	155.36	18.67	2.78
3.47	50.00	103.57	155.36	18.40	3.33
4.63	50.00	103.57	155.36	17.87	4.45
5.78	50.00	103.57	155.36	17.34	5.55

ตารางที่ 4.7 อัตราส่วนผสม w/c = 0.5 ที่น้ำยางพาราปริมาณต่าง ๆ

r/c (%)	ปูน (kg.)	ทราย (kg.)	หิน (kg.)	น้ำ (kg.)	น้ำยาง (kg.)
0	50.00	103.57	155.36	25.00	0.00
0.58	50.00	103.57	155.36	24.73	0.56
1.16	50.00	103.57	155.36	24.47	1.11
1.73	50.00	103.57	155.36	24.20	1.66
2.31	50.00	103.57	155.36	23.94	2.22
2.89	50.00	103.57	155.36	23.67	2.78
3.47	50.00	103.57	155.36	23.40	3.33
4.63	50.00	103.57	155.36	22.87	4.45
5.78	50.00	103.57	155.36	22.34	5.55

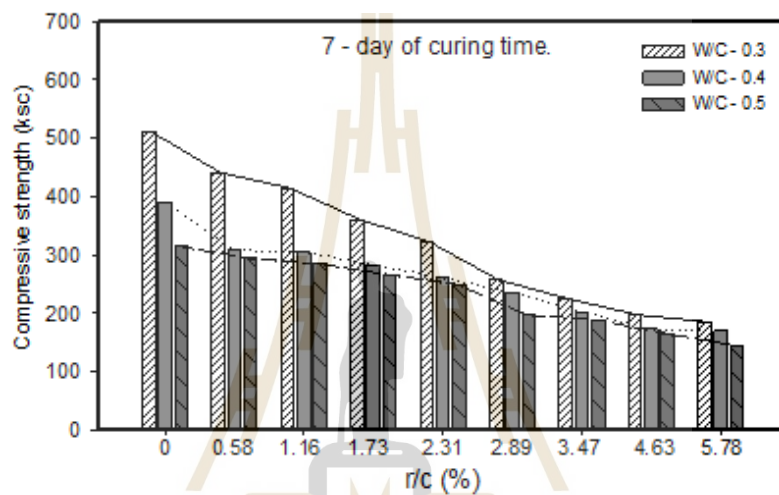
4.2.2 ผลการทดสอบของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา

ได้ศึกษาและทดสอบเพื่อทราบค่ากำลังอัด, กำลังดัด, ความทนทาน และการการต้านทานความล้า ของคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา โดยผลการทดสอบของคอนกรีตที่มีปริมาณเนื้อยางต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (r/c) ร้อยละ 0, 0.58, 1.16, 1.73, 2.31, 2.89, 3.47, 4.63 และ 5.78 โดยน้ำหนัก โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 ซึ่งใช้วิธีการบ่มเปียกโดยการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน มีรายละเอียดการทดสอบ ดังนี้

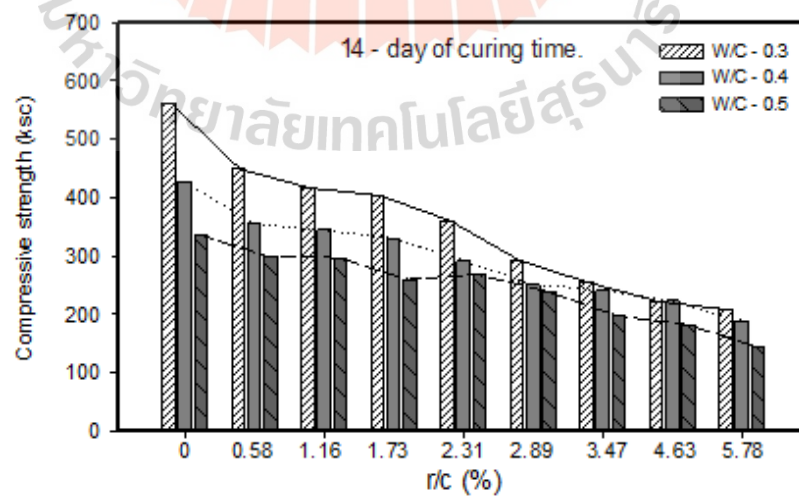
4.2.2.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา

ผลการทดสอบของคอนกรีตที่มีปริมาณเนื้อยางต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (r/c) ร้อยละ 0, 0.58, 1.16, 1.73, 2.31, 2.89, 3.47, 4.63 และ 5.78 โดยน้ำหนัก โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 ซึ่งใช้วิธีการบ่มเปียกโดยการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3(a) ถึง 4.3(c) ตามลำดับ จากผลการทดสอบ พบว่า กำลังอัดสูงสุดของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน อยู่ที่อัตราส่วน r/c ร้อยละ 0 โดยมีกำลังอัดเท่ากับ 639.46, 466.72 และ 407.67 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับอัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 ตามลำดับ และกำลังอัดต่ำสุดที่อัตราส่วน r/c ร้อยละ 5.78 โดยที่กำลังอัดเท่ากับ 322.15, 209.97 และ 179.07 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับอัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 ตามลำดับ ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่า กำลังอัดลดลง เมื่ออัตราส่วน w/c และ r/c เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุบ่ม 7 และ 14 วัน และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของอายุการบ่มที่ใช้สำหรับการทดสอบ ต่อกำลังอัดของคอนกรีต พบว่า กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตาม

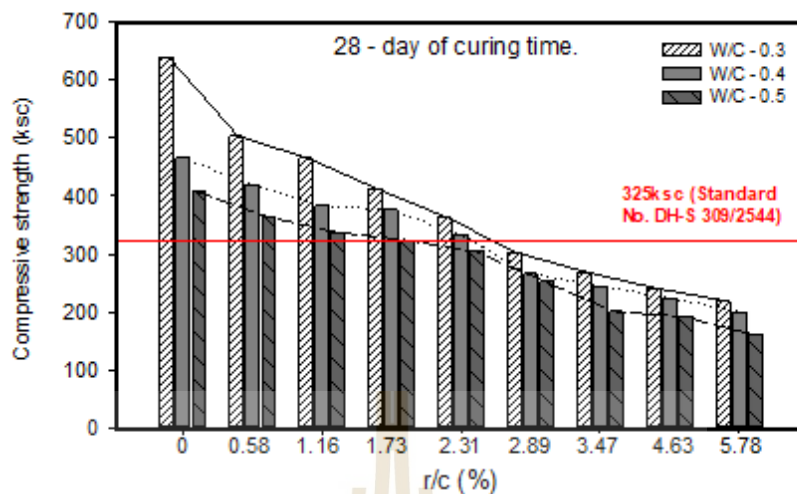
อายุบ่มที่เพิ่มมากขึ้น การลดลงของกำลังอัดเมื่ออัตราส่วน r/c เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yaowarat et al., 2017 ซึ่งได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติคอนกรีตด้วยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) พบว่า เมื่อผสม PVA กับคอนกรีต จะส่งผลให้เกิดแผ่นฟิล์มแทรกตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีต ดังนั้น อัตราส่วน PVA ต่อปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นจะมีผลต่อการก่อตัวระยะต้นและการก่อตัวระยะปลายของคอนกรีตล่าช้ากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสม PVA จึงส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสม PVA ลดลง



รูปที่ 4.3(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive strength กับ r/c ที่อายุการบ่ม 7 วัน

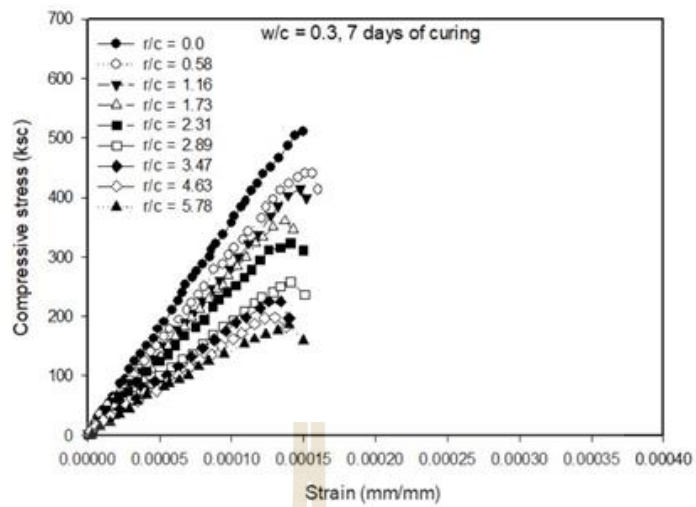


รูปที่ 4.3(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive strength กับ r/c ที่อายุการบ่ม 14 วัน

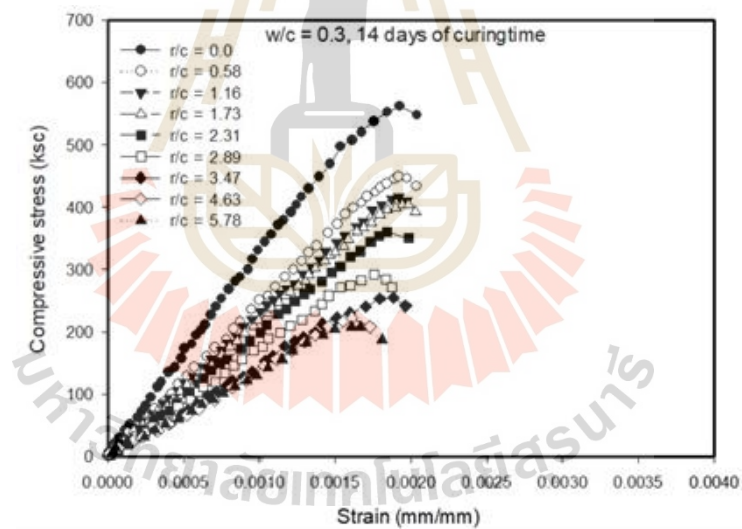


รูปที่ 4.3(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive strength กับ r/c ที่อายุการบ่ม 28 วัน

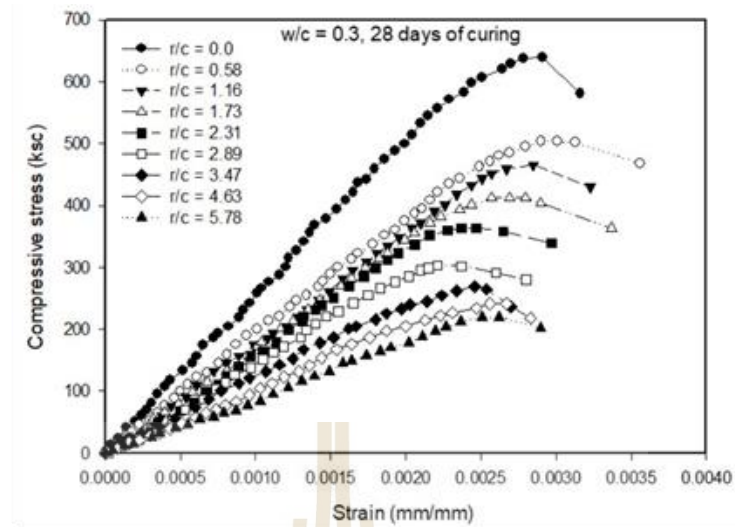
รูปที่ 4.4 ถึง 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress กับ Strain ของคอนกรีตที่มีปริมาณเนื้อยางต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (r/c) ร้อยละ 0, 0.58, 1.16, 1.73, 2.31, 2.89, 3.47, 4.63 และ 5.78 โดยน้ำหนัก โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน พบว่า ที่อัตราส่วน w/c เท่ากัน อัตราส่วน r/c ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่น (ความชันของกราฟในช่วงยืดหยุ่น) ลดลง ก่อให้เกิดการลดลงของกำลังอัดของคอนกรีต โดยที่ ตัวอย่างทดสอบที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เกิดการวิบัติในช่วงของความเครียดประมาณ 0.00013, 0.00017 และ 0.0003 ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังพบว่า ความเครียดที่จุดวิบัติมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ตามอัตราส่วน w/c ที่ลดลง เนื่องจากความสามารถในการดูดซับพลังงาน และความแกร่งของคอนกรีตเพิ่มขึ้น



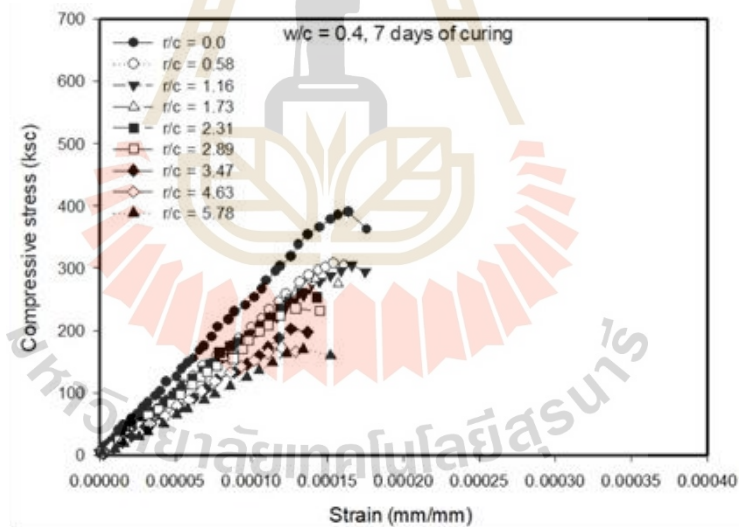
รูปที่ 4.4(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress กับ Strain ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3 ที่อายุการบ่ม 7 วัน



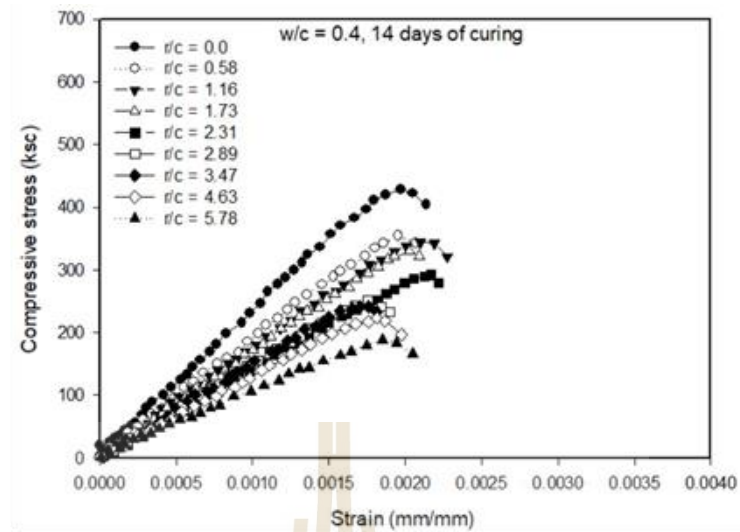
รูปที่ 4.4(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress กับ Strain ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3 ที่อายุการบ่ม 14 วัน



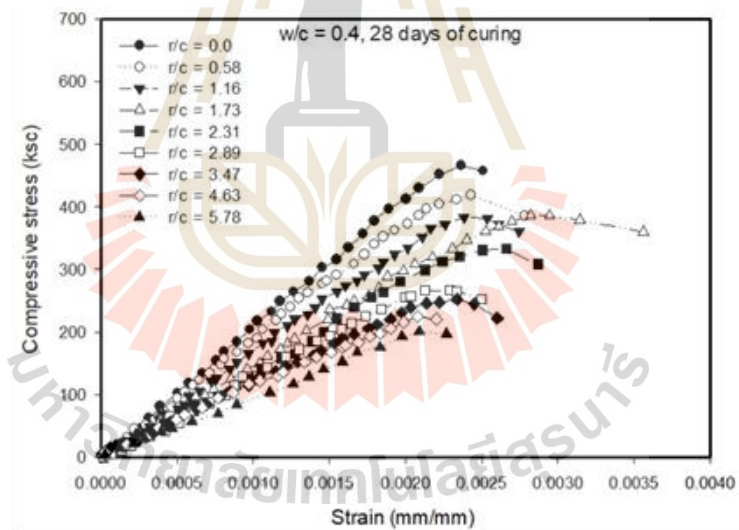
รูปที่ 4.4(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress กับ Strain ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3 ที่อายุการบ่ม 28 วัน



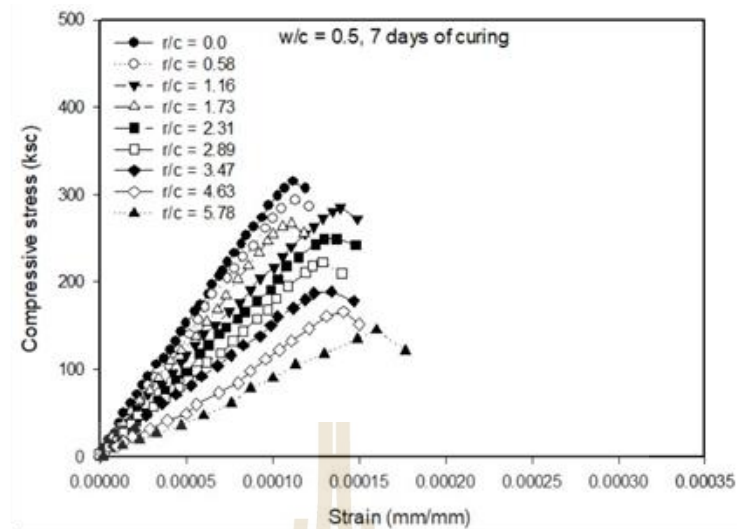
รูปที่ 4.5(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress กับ Strain ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4 ที่อายุการบ่ม 7 วัน



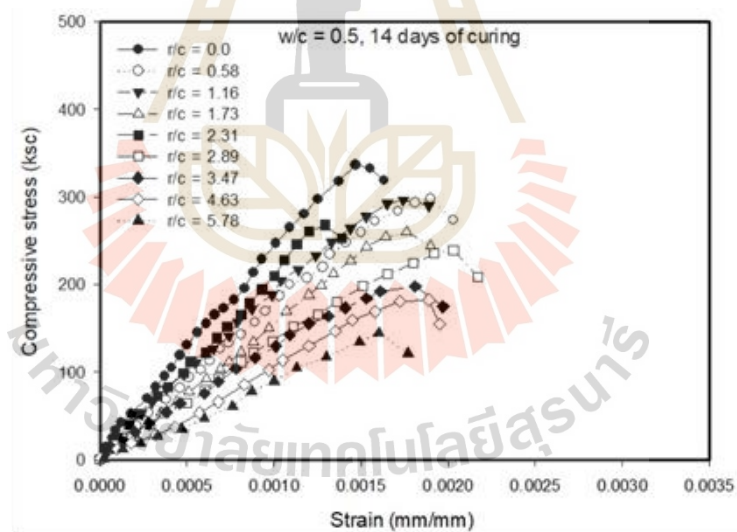
รูปที่ 4.5(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress กับ Strain ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4 ที่อายุการบ่ม 14 วัน



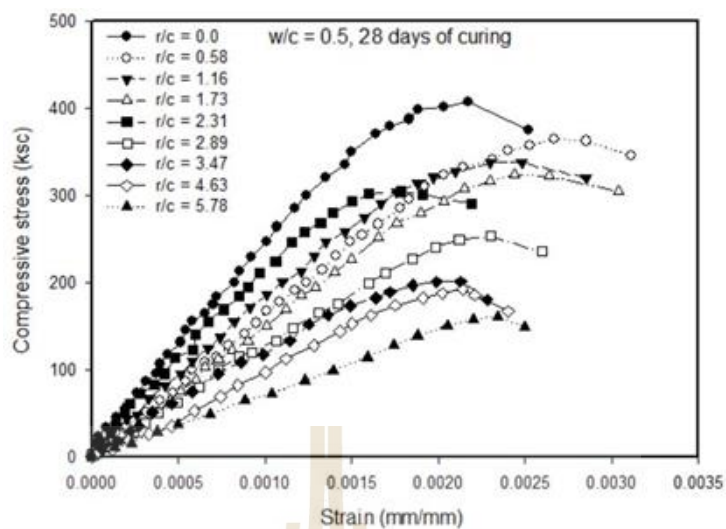
รูปที่ 4.5(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress กับ Strain ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4 ที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 4.6(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress กับ Strain ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 ที่อายุการบ่ม 7 วัน



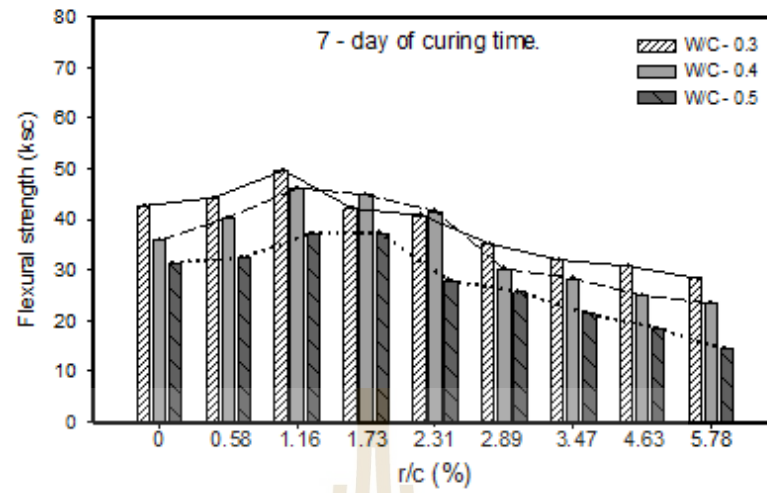
รูปที่ 4.6(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress กับ Strain ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 ที่อายุการบ่ม 14 วัน



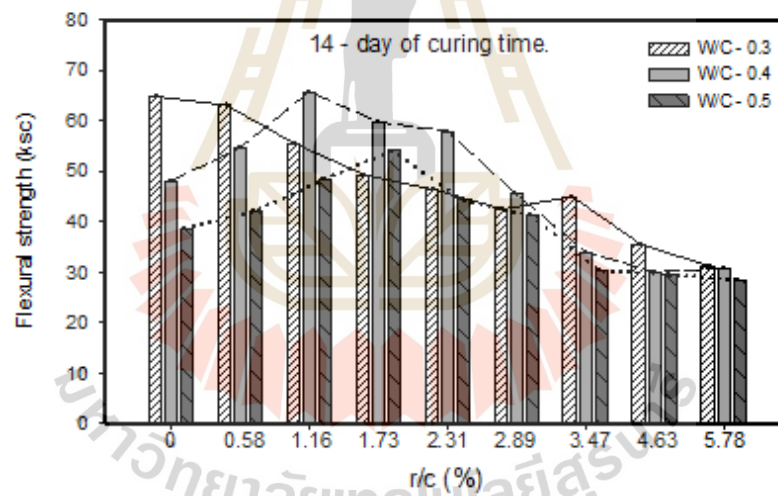
รูปที่ 4.6(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive stress กับ Strain ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 ที่อายุการบ่ม 28 วัน

4.2.2.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมน้ำยาง preblend

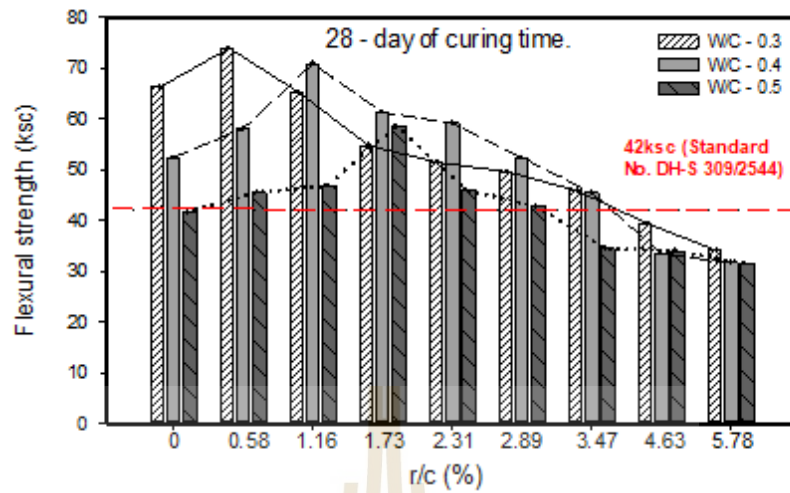
ผลการทดสอบคอนกรีตที่มีปริมาณเนื้อยางต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (r/c) ร้อยละ 0, 0.58, 1.16, 1.73, 2.31, 2.89, 3.47, 4.63 และ 5.78 โดยน้ำหนัก โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 ซึ่งใช้วิธีการบ่มเปียกโดยการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน ดังรูปที่ 4.7(a) ถึง 4.7(c) ตามลำดับ จากผลการทดสอบ เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน w/c เดียวกัน พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน r/c จนกระทั่งถึงอัตราส่วน r/c เหมาะสมที่ทำให้กำลังอัดมีค่าสูงสุด จากนั้น กำลังอัดมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน r/c สำหรับอัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 จะมีค่ากำลังอัดสูงสุดที่อัตราส่วน r/c ร้อยละ 0.58, 1.16 และ 1.73 ตามลำดับ จะเห็นว่า อัตราส่วน r/c ที่เหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน w/c ที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Shivananda (1998) ที่พบว่า การใช้ยางชั้นที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งไม่เกินร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ สามารถเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตได้



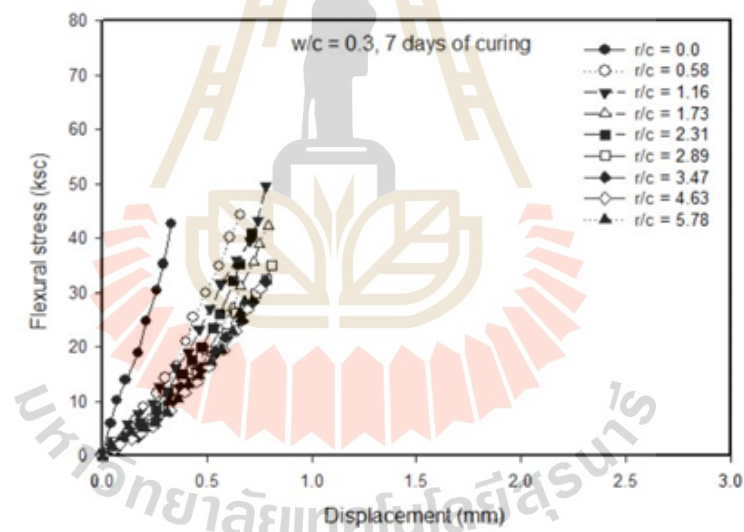
รูปที่ 4.7(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength กับ r/c ที่อายุการบ่ม 7 วัน



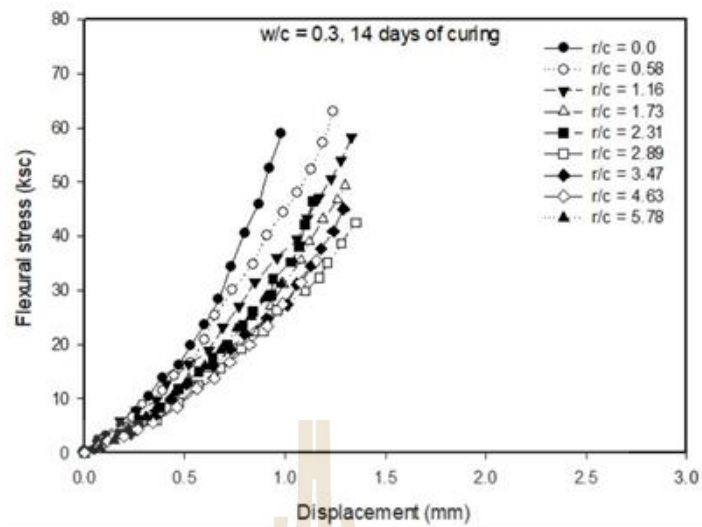
รูปที่ 4.7(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength กับ r/c ที่อายุการบ่ม 14 วัน



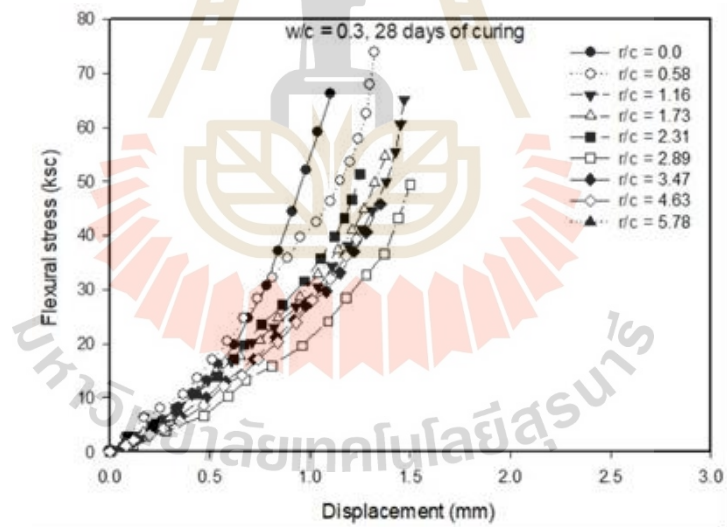
รูปที่ 4.7(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength กับ r/c ที่อายุการบ่ม 28 วัน



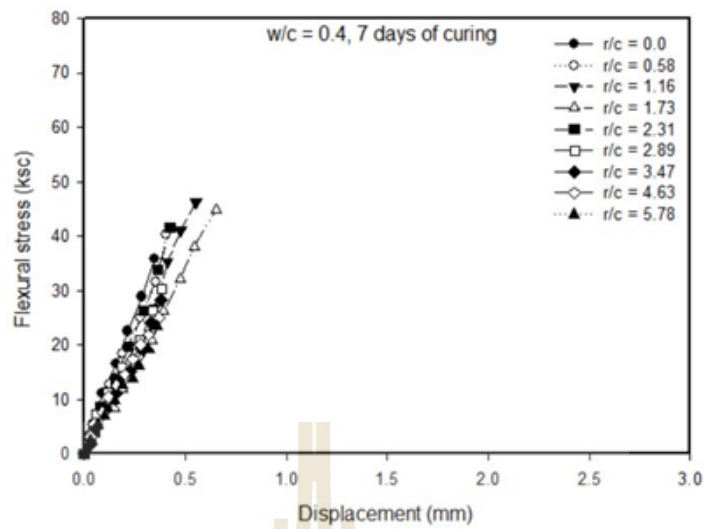
รูปที่ 4.8(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress กับ Displacement ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3 ที่อายุการบ่ม 7 วัน



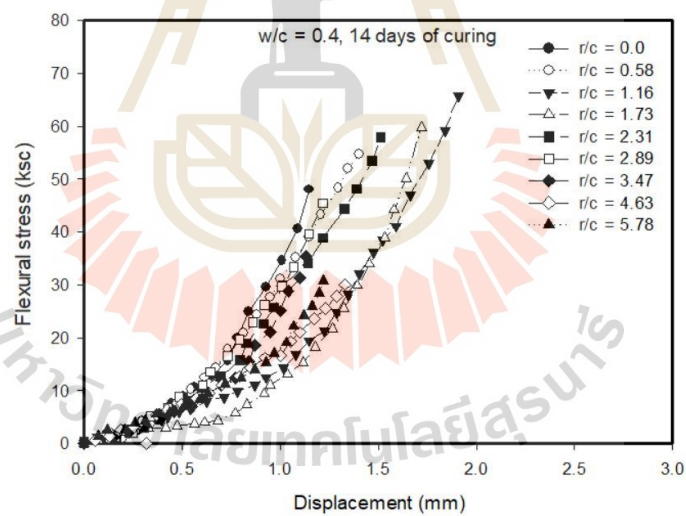
รูปที่ 4.8(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress กับ Displacement ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3 ที่อายุการบ่ม 14 วัน



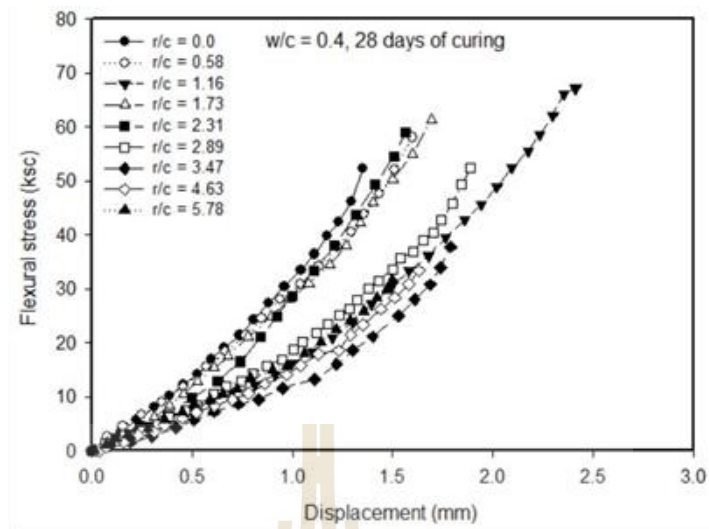
รูปที่ 4.8(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress กับ Displacement ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3 ที่อายุการบ่ม 28 วัน



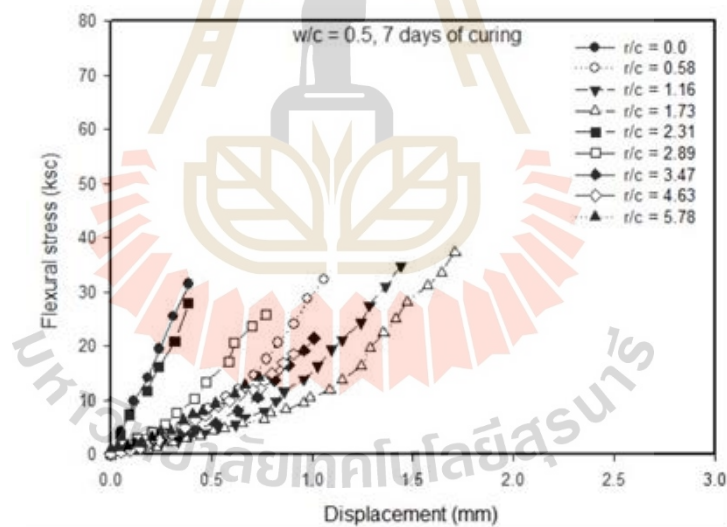
รูปที่ 4.9(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress กับ Displacement ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4 ที่อายุการบ่ม 7 วัน



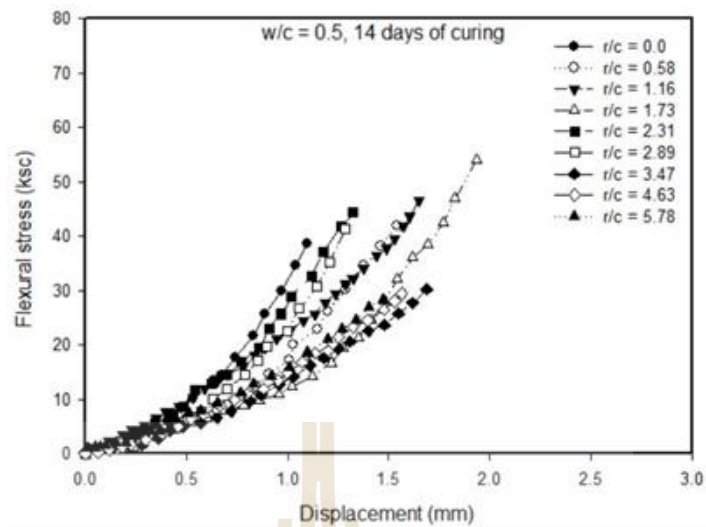
รูปที่ 4.9(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress กับ Displacement ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4 ที่อายุการบ่ม 14 วัน



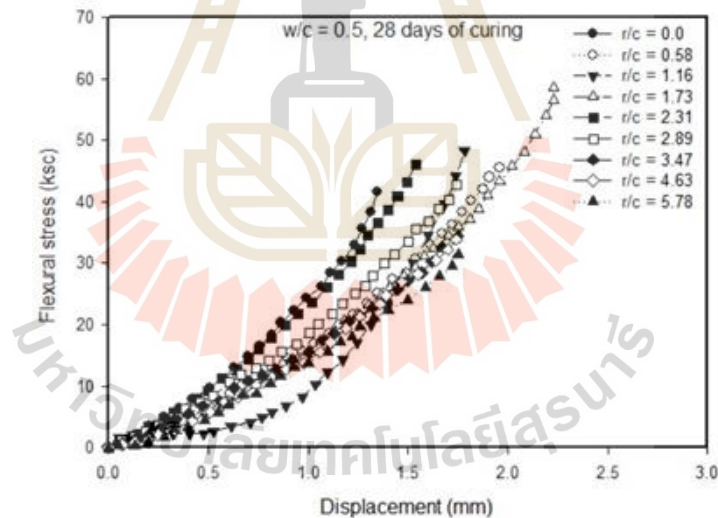
รูปที่ 4.9(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress กับ Displacement ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4 ที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 4.10(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress กับ Displacement ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 ที่อายุการบ่ม 7 วัน



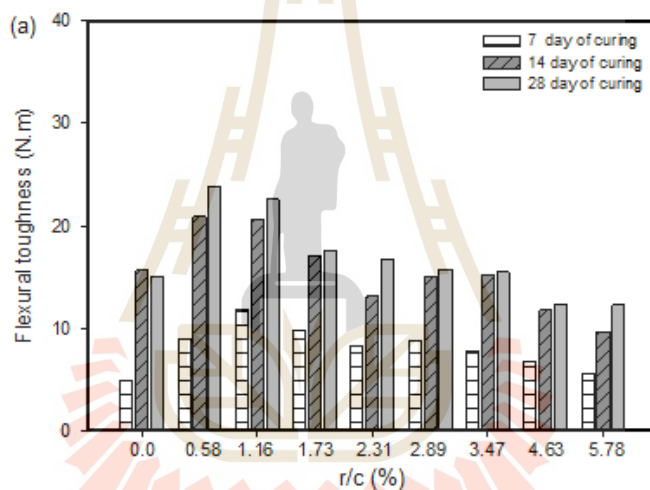
รูปที่ 4.10(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress กับ Displacement ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 ที่อายุการบ่ม 14 วัน



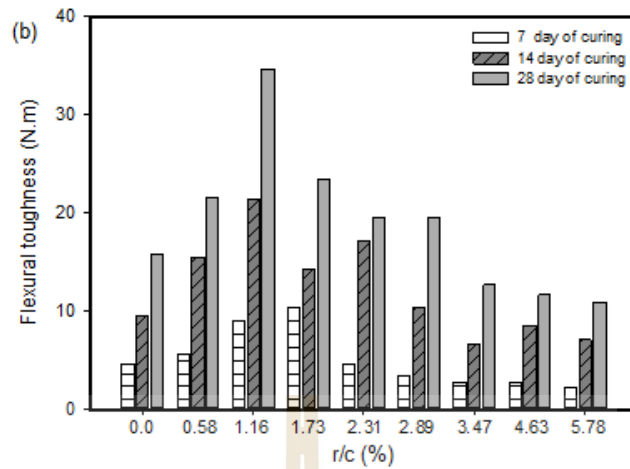
รูปที่ 4.10(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress กับ Displacement ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 ที่อายุการบ่ม 28 วัน

รูปที่ 4.8 ถึง 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress กับ Displacement ของตัวอย่างคอนกรีตที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3 ถึง 0.5 ตามลำดับ จะเห็นว่า ค่า Displacement ที่จุดวิบัติมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน r/c จนถึงค่าอัตราส่วน r/c ที่เหมาะสม หลังจากนั้นค่า Displacement ที่จุดวิบัติมีค่าลดลงตามอัตราส่วน r/c ที่เพิ่มขึ้น

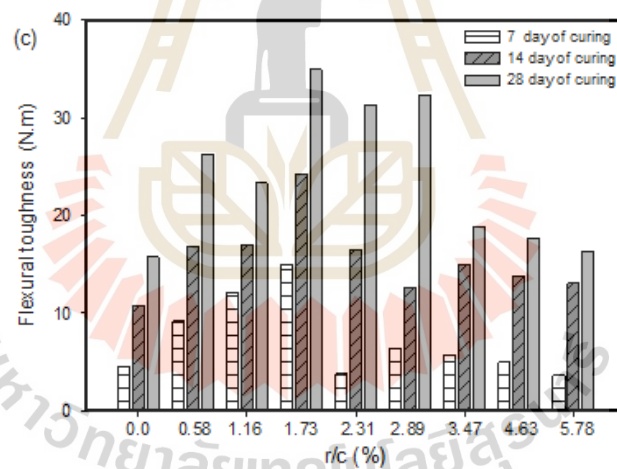
ค่าความเหนียว (flexural toughness) คือ ความสามารถดูดซับพลังงานของคอนกรีต โดยไม่เกิดการแตกหัก โดยพิจารณาจากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความสัมพันธ์ของ Flexural stress กับ Displacement รูปที่ 23(a) ถึง 23(c) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนียว และ r/c ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3 ถึง 0.5 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน w/c ที่ค่าเดียวกัน Flexural toughness จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงอัตราส่วน r/c ที่เหมาะสม และจะลดลงเมื่ออัตราส่วน r/c เพิ่มขึ้น ในรูปที่ 4.7 และยังพบว่า Flexural toughness มีค่าสูงขึ้นตามอายุบ่มของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nagraj et al. (1988) ที่ศึกษาการใช้น้ำยาร่วมกับสารลดน้ำในคอนกรีต พบว่า การเติมน้ำยาร่วมในปริมาณยงแห้งร้อยละ 2 เป็นปริมาณที่เหมาะสม ช่วยเพิ่มความเหนียวของคอนกรีตโดยปราศจากการลดลงของกำลังอัดและยังเพิ่มกำลังดึงของคอนกรีตด้วย



รูปที่ 4.11(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง flexural toughness กับ อัตราส่วน r/c ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3



รูปที่ 4.11(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง flexural toughness กับ อัตราส่วน r/c ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4



รูปที่ 4.11(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง flexural toughness กับ อัตราส่วน r/c ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5

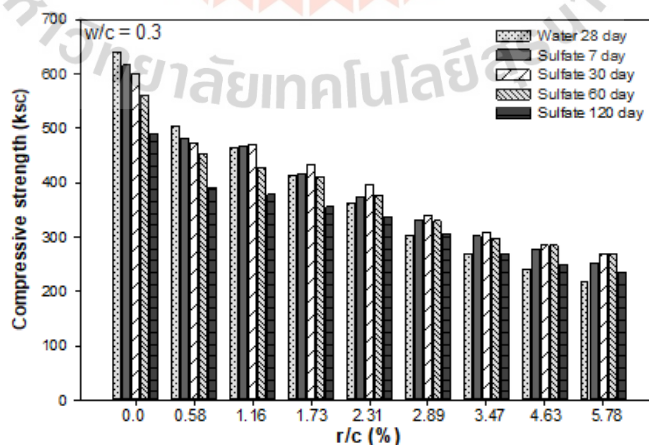
จากผลการทดสอบกำลังอัดและกำลังดัด สามารถสรุปอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่มีกำลังอัดและกำลังดัดผ่านตามมาตรฐานของกรมทางหลวงได้ดังนี้

ข้อกำหนดที่ ทล.-ม. 309/2544 ระบุว่า คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน ค่ากำลังอัดและค่ากำลังดัด ต้องไม่ต่ำกว่า 325 และ 42 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งพบว่าอัตราส่วน r/c ที่ให้ค่ากำลังอัดและค่ากำลังดัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง สามารถใช้ในการออกแบบความหนา

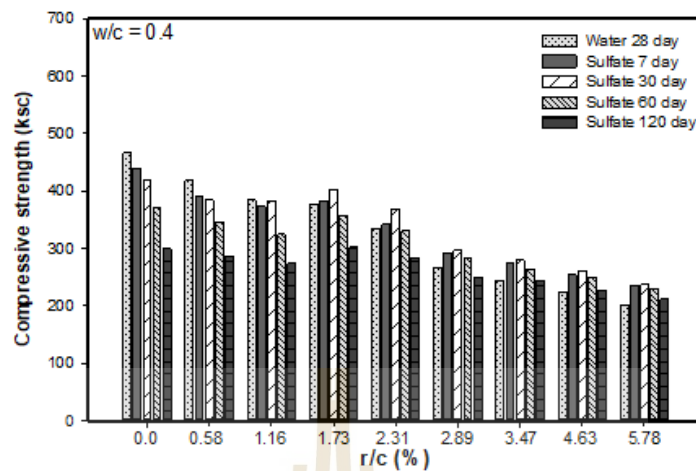
ของผิวทางคอนกรีต ได้แก่ อัตราส่วน r/c ร้อยละ 0, 0.58, 1.16, 1.73 และ 2.31 สำหรับอัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3 และ 0.4 และอัตราส่วน r/c เท่ากับ 0.58, 1.16 สำหรับอัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5

4.2.2.3 การทดสอบความทนทานต่อโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)

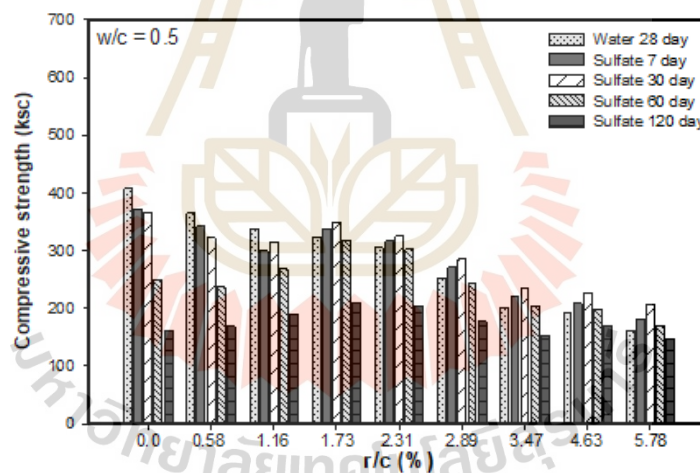
การทดสอบความทนทานต่อโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างคอนกรีตผสมน้ำยาง preblend โดยการบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำธรรมชาติเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นบ่มตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักน้ำ แล้วจึงทำการทดสอบกำลังอัดและกำลังดัดหลังจากบ่มตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่ระยะเวลา 7, 30, 60 และ 120 วัน ผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างที่บ่มในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เปรียบเทียบกับผลทดสอบตัวอย่างที่บ่มในน้ำธรรมชาติที่ระยะเวลา 28 วัน ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 แสดงดังรูปที่ 4.12(a) ถึง 4.12(c) ตามลำดับ จากผลการทดสอบ พบว่า ที่อัตราส่วน w/c เดียวกัน เมื่อพิจารณาที่อายุบ่มเดียวกัน ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วน r/c ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ที่อัตราส่วน r/c ร้อยละ 1.73, 2.31, 2.89 3.41, 4.73 และ 5.78 ที่อายุบ่มในโซเดียมซัลเฟต 7 และ 30 วัน ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และลดต่ำลงที่อายุบ่ม 60 และ 120 วัน ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตได้เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน r/c ผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับ Bala et al. (2009) การศึกษา กำลังอัดคอนกรีตผสมน้ำยางพาราในสภาวะที่บ่มด้วยสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5.0 ของน้ำหนักน้ำ ณ ระยะเวลาการบ่มในโซเดียมซัลเฟต 7, 28 และ 56 วัน ซึ่งพบว่า การผสมน้ำยางพาราในคอนกรีตทำให้เกิดแผ่นฟิล์มเคลือบผิว ซึ่งแผ่นฟิล์มดังกล่าว สามารถป้องกันการแทรกซึมของโซเดียมซัลเฟตเข้าสู่โครงสร้างภายในคอนกรีต



รูปที่ 4.12(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive Strength กับ อัตราส่วน r/c ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3



รูปที่ 4.12(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive Strength กับ อัตราส่วน r/c ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4

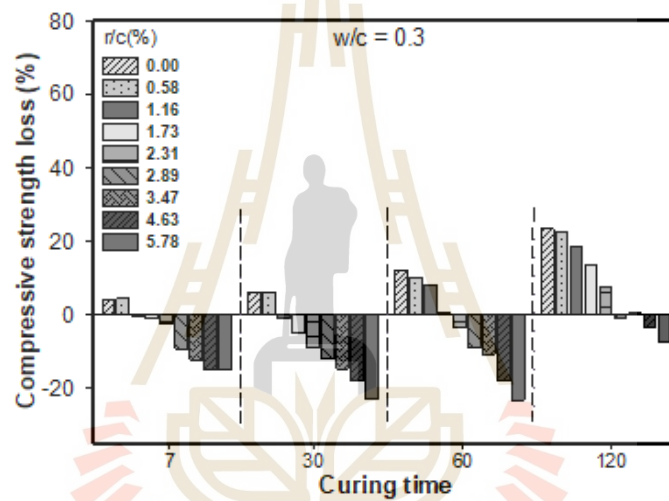


รูปที่ 4.12(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive Strength กับ อัตราส่วน r/c ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5

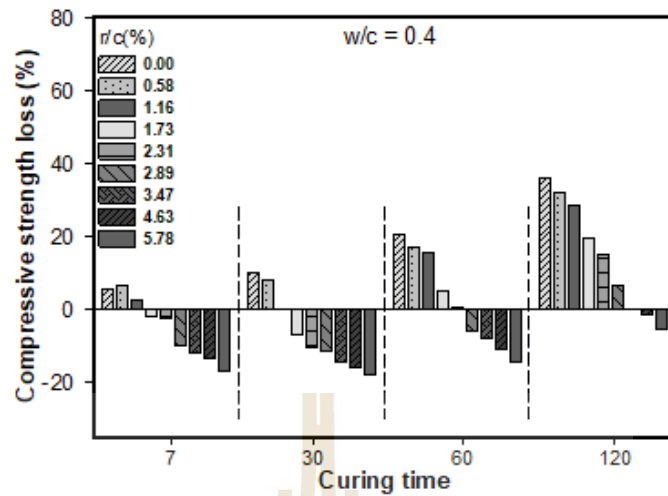
ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากการกักกร่อนโดยโซเดียมซัลเฟตที่อัตราส่วน r/c ต่าง ๆ กับระยะเวลาบ่มในโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 แสดงดังรูปที่ 4.13(a) ถึง 4.13(c) ตามลำดับ จะเห็นว่า คอนกรีตธรรมดา (r/c = 0) มีอัตราการสูญเสียกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่เติมน้ำยาง preblend (r/c > 0) และเมื่ออัตราส่วน r/c เพิ่มขึ้น การสูญเสียกำลังอัดจะมีแนวโน้มลดลง ขณะที่อายุบ่มในโซเดียมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการ

สูญเสยกำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ในระหว่างที่บ่มในโซเดียมซัลเฟต คอนกรีตยังคงทำปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่อง เห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด (อัตราการสูญเสยกำลังอัดที่เป็นลบ) ผลการทดสอบดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า คอนกรีตที่เติมน้ำยาล้าง preblend มีความสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟตได้ดี

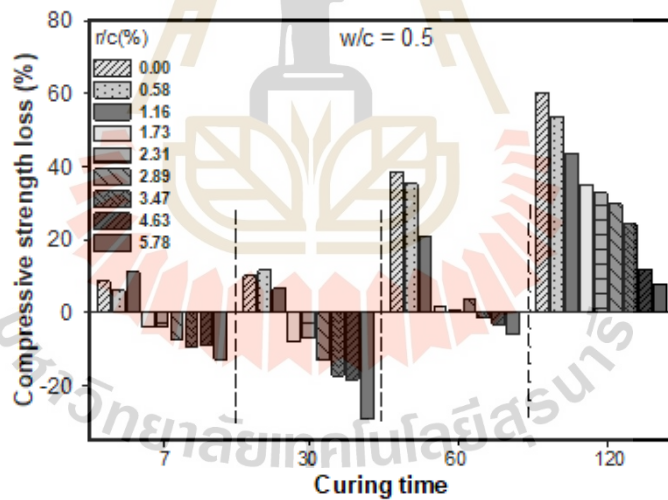
นอกจากนี้ ยังพบว่า การสูญเสยกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน w/c สูงขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่า อัตราส่วน w/c และอัตราส่วน r/c มีผลโดยตรงต่อความทนทานต่อการกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟต โดยที่ คอนกรีตที่มีอัตราส่วน r/c สูง และอัตราส่วน w/c ต่ำ สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตได้ดี



รูปที่ 4.13(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive Strength loss กับ อายุบ่มในโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3



รูปที่ 4.13(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive Strength loss กับ อายุบ่มไนโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4

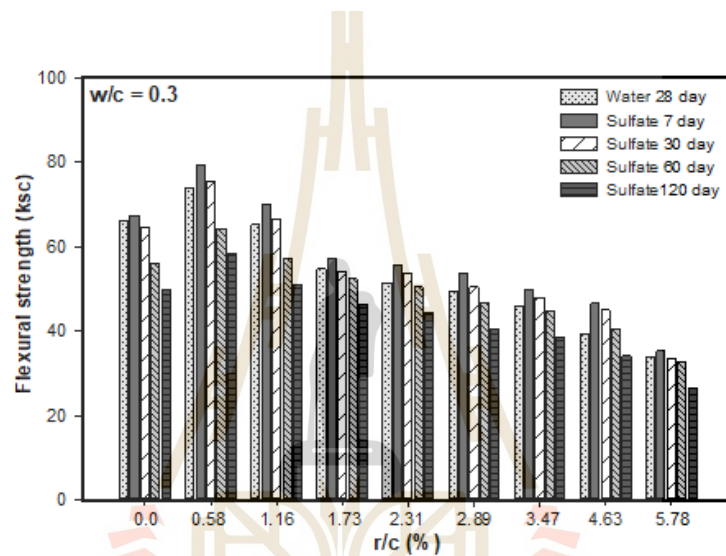


รูปที่ 4.13(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive Strength loss กับ อายุบ่มไนโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5

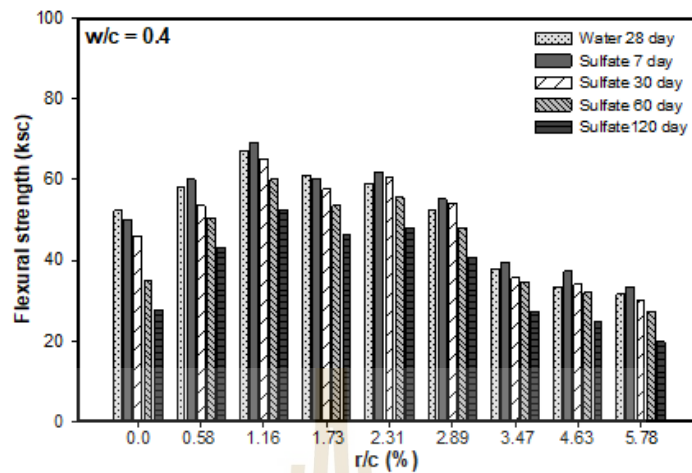
ผลการทดสอบกำลังตัดของตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เปรียบเทียบกับ ผลทดสอบตัวอย่างที่แช่ในน้ำธรรมดาเป็นเวลา 28 วัน ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 แสดงดังรูปที่ 4.14(a) ถึง 4.14(c) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน w/c และอายุบ่มเดียวกัน

พบว่า ค่ากำลังดัดมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่ออัตราส่วน r/c สูงขึ้น จนถึงอัตราส่วน r/c ที่เหมาะสม จากนั้น กำลังดัดมีค่าลดต่ำลงตามการเพิ่มขึ้นของ r/c

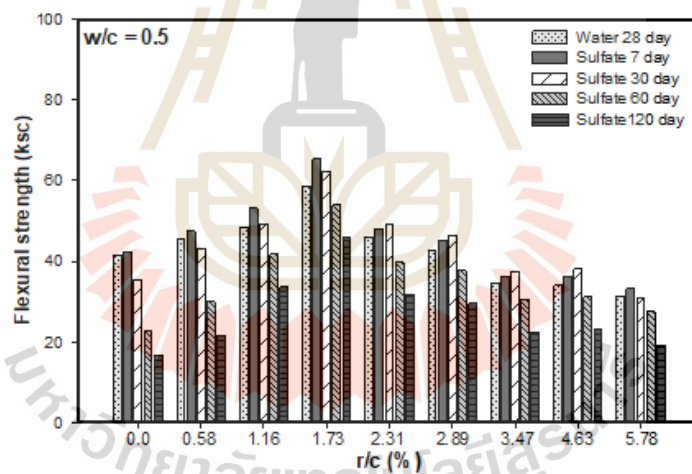
พิจารณาที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3 และ 0.4 ในทุกอัตราส่วน r/c กำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงอายุบ่มในโซเดียมซัลเฟต 7 วัน หลังจากนั้นกำลังดัดมีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุบ่มในโซเดียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 พบว่า ที่อัตราส่วน r/c ร้อยละ 0 ถึง 1.73 กำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงอายุบ่มในโซเดียมซัลเฟต 7 วัน ขณะที่ เมื่ออัตราส่วน r/c มากกว่าร้อยละ 1.73 กำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงอายุบ่ม 30 วัน หลังจากนั้นกำลังดัดมีค่าลดลงตามอายุบ่มที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength กับ อัตราส่วน r/c ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3



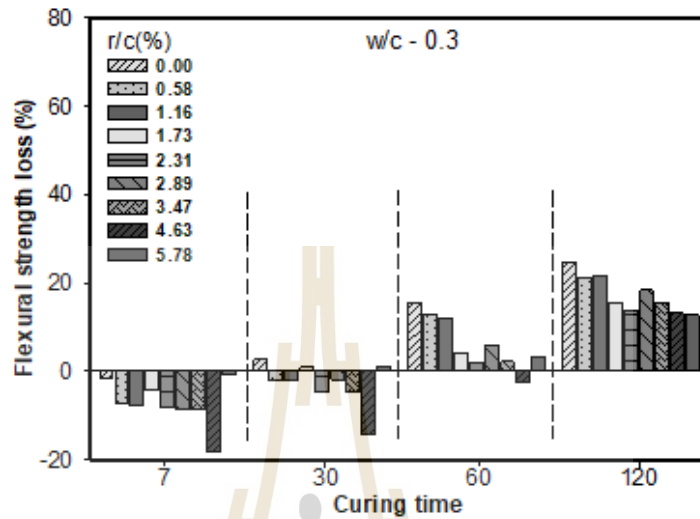
รูปที่ 4.14(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength กับ อัตราส่วน r/c ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4



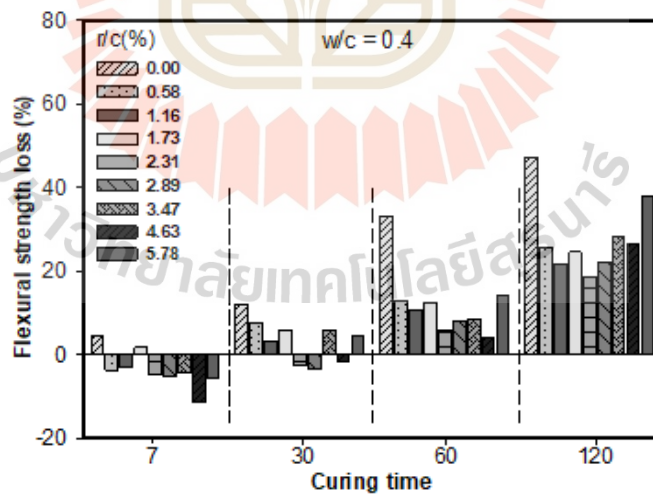
รูปที่ 4.14(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength กับ อัตราส่วน r/c ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการสูญเสียกำลังตัดเนื่องจากการกัดกร่อนโดยโซเดียมซัลเฟต ที่ระยะเวลาการบ่มในโซเดียมซัลเฟตเท่ากับ 7, 30, 60 และ 120 วัน ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียกำลังตัดกับอายุบ่มในโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 แสดงดังรูปที่ 4.15(a) ถึง 4.15(c) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตที่เติมน้ำยารักษา (r/c > 0) กับคอนกรีตธรรมดา (r/c = 0) พบว่า คอนกรีตธรรมดามีแนวโน้มการสูญเสียกำลังตัดมากกว่าคอนกรีตที่เติม

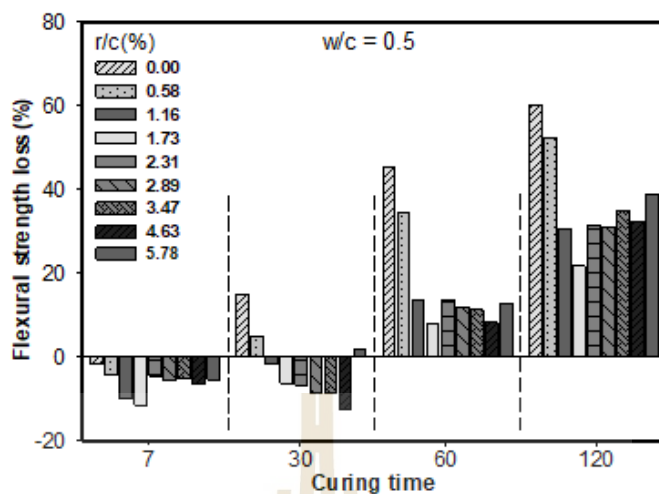
น้ำยาง preblend และการสูญเสียกำลังดัดมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วน r/c เพิ่มขึ้น ขณะที่อายุบ่มในโซเดียมซัลเฟตและอัตราส่วน w/c ที่สูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการสูญเสียกำลังดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.15(a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength loss กับ อายุบ่มในโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3



รูปที่ 4.15(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength loss กับ อายุบ่มในโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.4

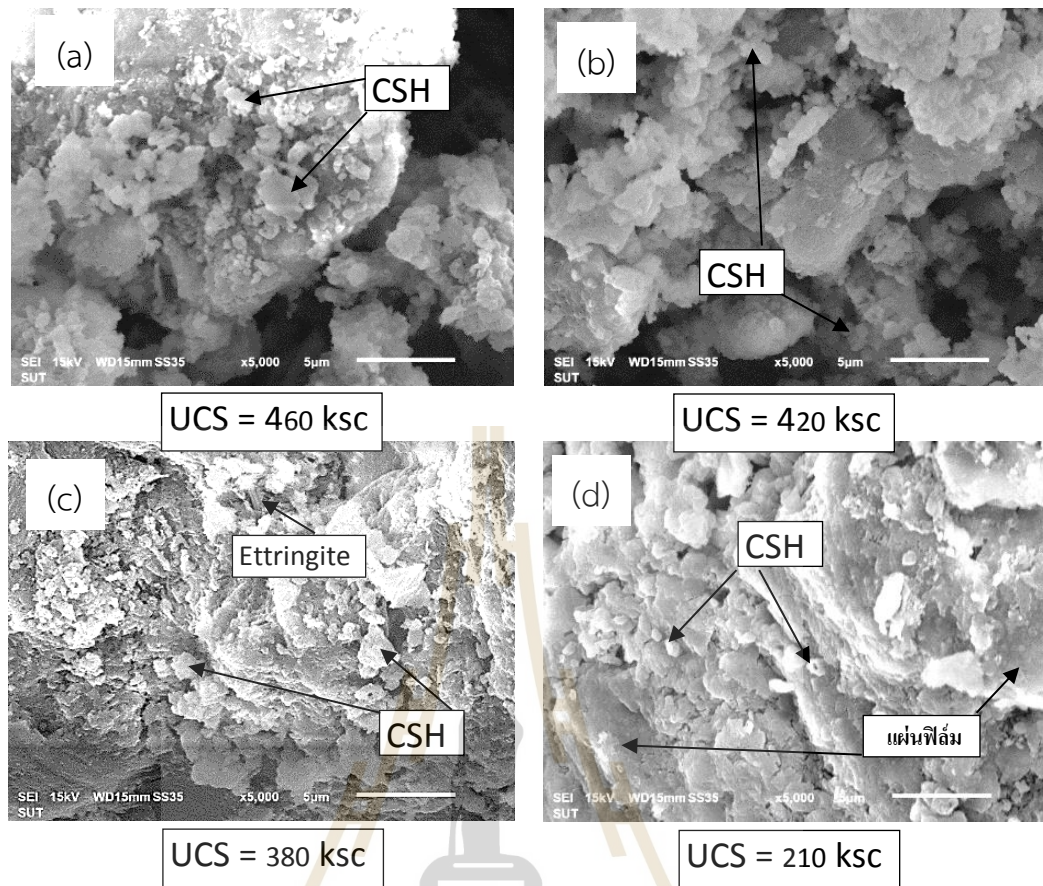


รูปที่ 4.15(c) ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength loss กับ อายุบ่มในโซเดียมซิลเฟต ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5

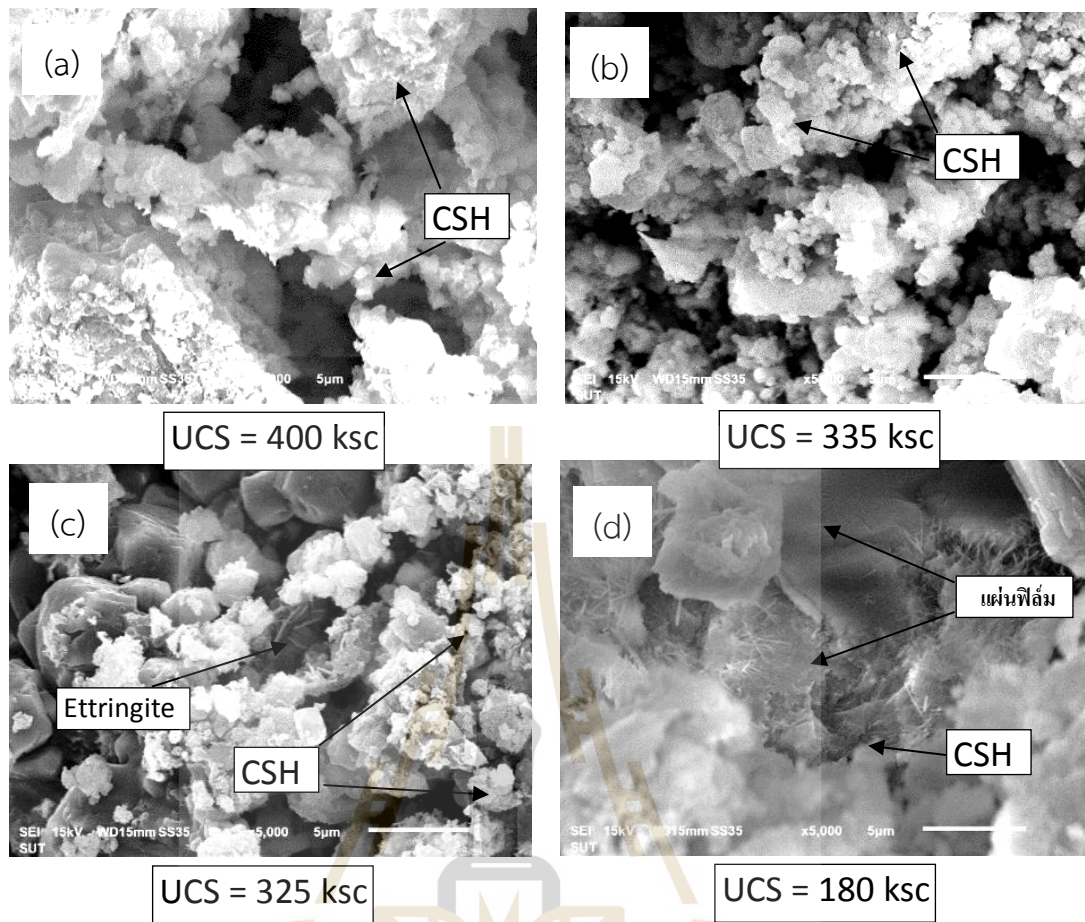
4.3 โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure)

4.3.1 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากผลการวิเคราะห์ SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (a) ถึง 4.16 (d) และ 4.32 (a) ถึง 4.17 (d) พบว่า ช่องว่างของตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วน r/c เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณยางพาราเกินอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดไปแล้ว จะพบว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะถูกแทนที่ด้วยฟิล์มของน้ำยางพาราธรรมชาติที่มีมากขึ้น ส่งผลให้น้ำยางพาราธรรมชาติไปหยุดยั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จากผลการวิเคราะห์ SEM สามารถสังเกตเห็นได้ว่ายางพาราทำหน้าที่อุดช่องว่างระหว่างอนุภาคของวัสดุส่งผลให้ปริมาณช่องว่างลดลง สอดคล้องกับผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4.12(a.) และ 4.12(c.) พบว่าการรื้อยละการลดลงของกำลังอัดและกำลังดัดเนื่องจากผลของสารละลายโซเดียมซิลเฟตมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ พบว่าแผ่นฟิล์ม (Para film) ที่ได้จากผลิตภัณฑ์น้ำยางพาราธรรมชาติจะช่วยลดการแตกร้าวในระดับจุลภาค (Micro crack) แผ่นฟิล์มจะเข้าแทรกซึมไปในช่องว่างระหว่างซีเมนต์ส่งผลให้ช่วยการยึดเกาะต้านทานการกร่อนและสึกหรอ จึงเป็นเหตุผลในเรื่องของกำลังอัดแกนเดียวที่ลดลง



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำ
 ยางพารา ที่กำลังขยาย 5000 (r/c ratio) (a) 0% , (b) 1% , (c) 1.5% และ (d) 5% ที่
 อัตราส่วน w/c = 0.4, อายุบ่ม 28 วัน

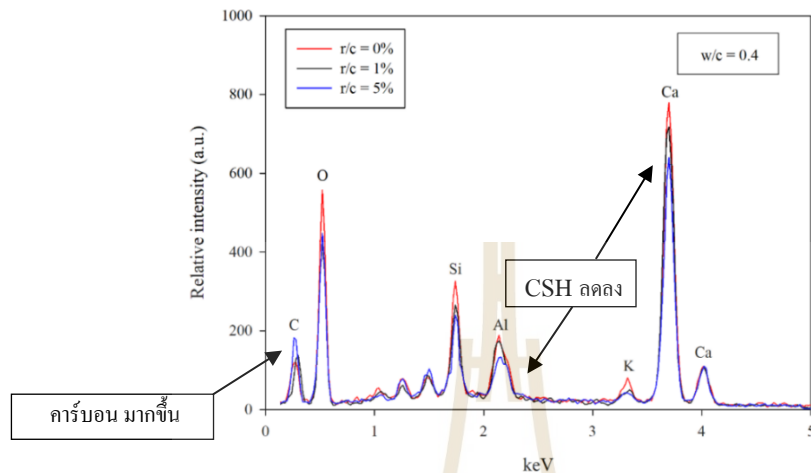


รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา ที่กำลังขยาย 5000 (r/c ratio) (a) 0% , (b) 1% , (c) 1.5% และ (d) 5% ที่อัตราส่วน w/c = 0.5 , อายุปม 28 วัน

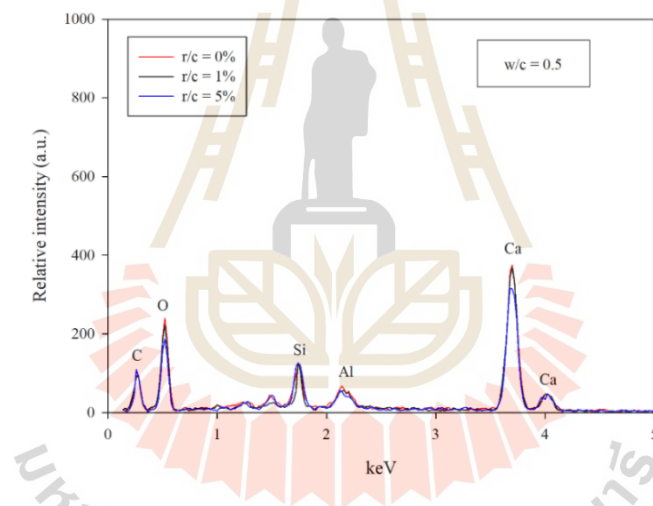
4.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค EDS

จากผลการวิเคราะห์ EDS ที่แสดงในรูปที่ 4.18(a) และ 4.18(b) พบว่าการแทรกตัวของแผ่นฟิล์มมีความหนาและบางแตกต่างกันตามปริมาณ r/c ที่ได้เติมผสมในคอนกรีต โดยผลการทดสอบ EDS จะสอดคล้องกับ SEM ที่ระบุได้ว่า องค์ประกอบทางเคมีของ CSH ที่เกิดขึ้น มีการพบธาตุคาร์บอน (C) และมีคาร์บอนมากขึ้น เมื่อเติม r/c เพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากแผ่นฟิล์มที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขัดขวางกันดูดซึมน้ำสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปริมาณ C เนื่องจากน้ำยางที่มีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วน r/c ที่เพิ่มขึ้น และการใช้อัตราส่วน w/c ที่ 0.4 มีผลทำให้ค่าสารประกอบทางเคมีของ CSH และ C เกิดขึ้นมากกว่า w/c ที่ 0.5 โดยมีความเกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ

คอนกรีต เพื่อเข้าใจถึงกลไกของอนุภาคยางพาราปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตมากขึ้น ผลการวิเคราะห์ การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และปริมาณความพรุนจะรายงานในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.18(a)



รูปที่ 4.18(b)

รูปที่ 4.18(a) และ 4.18(b) แสดงผลการวิเคราะห์ EDS

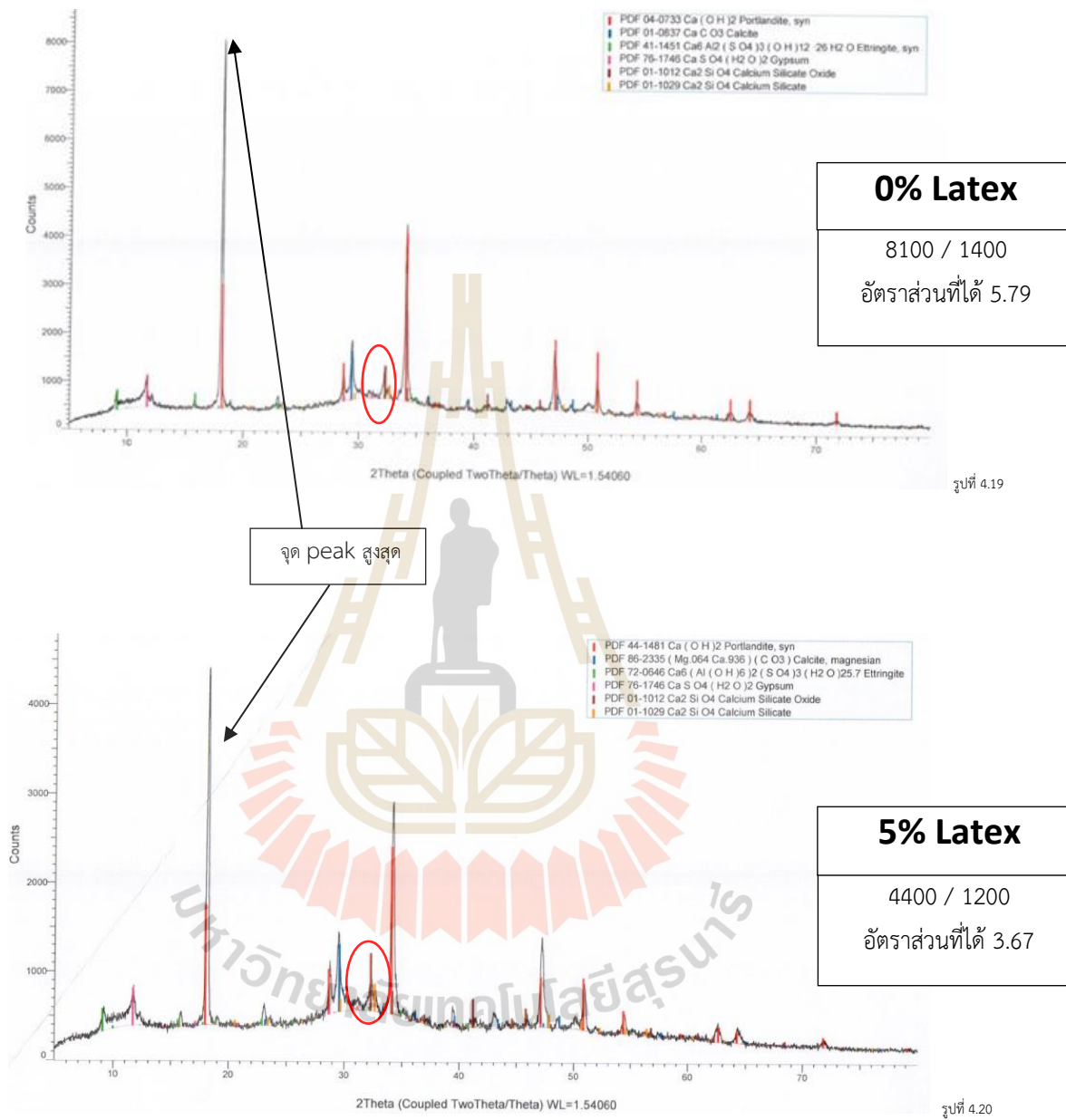
4.3.3 การวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงในรูปที่ 4.21(a) ถึง 4.21(h) ซึ่งให้เห็นว่าโครงสร้างภายในซีเมนต์เฟลต์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในการวิเคราะห์ เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา (ที่ไม่ได้เติมน้ำยาง) และคอนกรีตที่เติมน้ำพารา ที่ร้อยละ 0.5, 1 และ 5 ในคอนกรีตธรรมดาพบสารประกอบ Ca Si และ Al ในปริมาณมากที่สุด แต่ในคอนกรีตผสมน้ำยาง ที่ r/c ร้อยละ 1.16 พบ Ca Si และ Al ลดลงเล็กน้อย แต่พบปริมาณ C ที่สูงขึ้น และคอนกรีตที่ผสมน้ำยาง ที่ r/c ร้อยละ 5.78 พบ Ca Si และ Al ต่ำที่สุด แต่พบปริมาณ C สูงที่สุด อาจสืบเนื่องและวิเคราะห์ผลได้ว่าเกิดผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ลดลงเมื่ออัตราส่วน r/c เพิ่มขึ้น

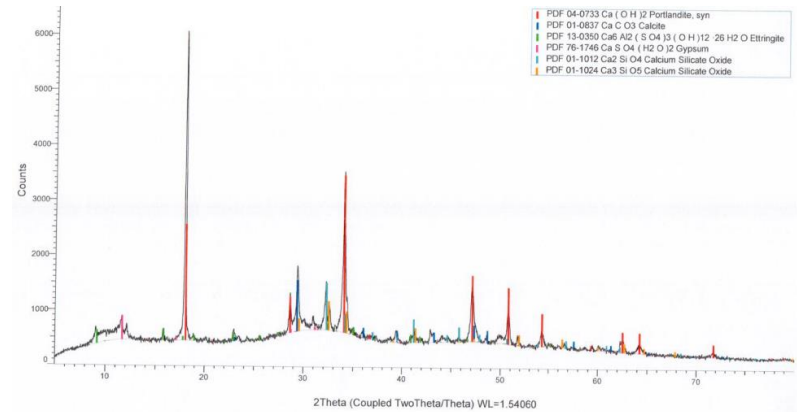
ทั้งนี้ จากการนำคอนกรีตผสมยางพารานำไปวิเคราะห์ XRD ทำให้วิเคราะห์ข้อมูลได้ 2 ส่วน คือ 1. การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ โดยจะวิเคราะห์ตัวอย่างที่ตำแหน่งสูงสุด หากไม่พบจุดสูงสุดแสดงว่าไม่มีการจับคู่ที่ดี โดยสารประกอบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น จะสร้างเฟสแตกต่างกันออกไป และการที่มีสารประกอบทางเคมี Ca_2SiO_4 เกิดขึ้น เป็นช่วงที่เหมาะสมที่จะนำมาสอบเทียบกับจุดสูงสุดของกราฟ และคำนวณอัตราส่วนของตัวอย่างได้

2. การวิเคราะห์เชิงปริมาณ มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ โดยเลือกในช่วง 20-23 และ ช่วงจุดสูงสุดของกราฟคือ 18-20 มาคำนวณหาอัตราส่วนเป็นวิธีการ Weight fraction of each phase เป็นช่วงที่บ่งบอกถึงเฟสของสารประกอบ Ca_2SiO_4 ว่ามีอัตราส่วนมากน้อยเพียงใด เพราะในเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีต จะเกิดขึ้น 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลายและในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ในซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้ อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้มีการพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภท หนึ่งในปฏิกิริยาที่มีผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ XRD ที่ 0% Latex กับ 5% Latex โดยให้ความสำคัญที่สารประกอบทางเคมี Ca_2SiO_4 คือปฏิกิริยาไฮเดรชันของซิลิเกต (C₃S , C₂S) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานจากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ ช่วยป้องกันการกัดกร่อนได้ดี เมื่อได้ทำการวิเคราะห์ตามหลักการวิเคราะห์เชิงปริมาณแสดงให้เห็นค่าอัตราส่วนที่น้อยลง มีความสอดคล้องกับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีต ที่เกิด CSH ลดลง เพราะมีผลมาจากการเติมปริมาณน้ำยางพาราที่เพิ่มมากขึ้น

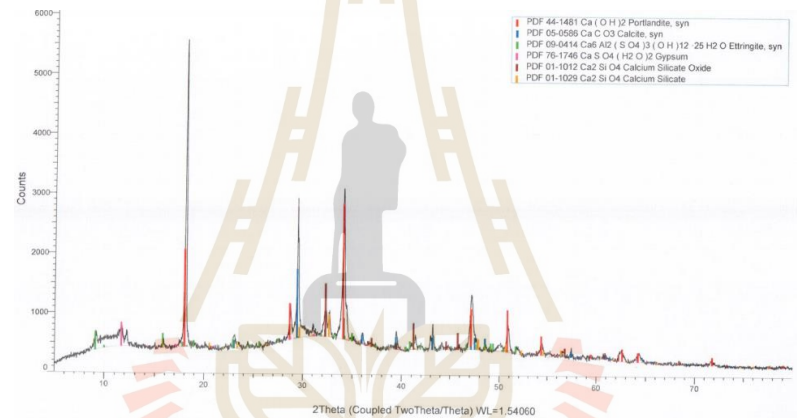
การแสดงตัวอย่างที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 อายุบ่ม 28 วัน



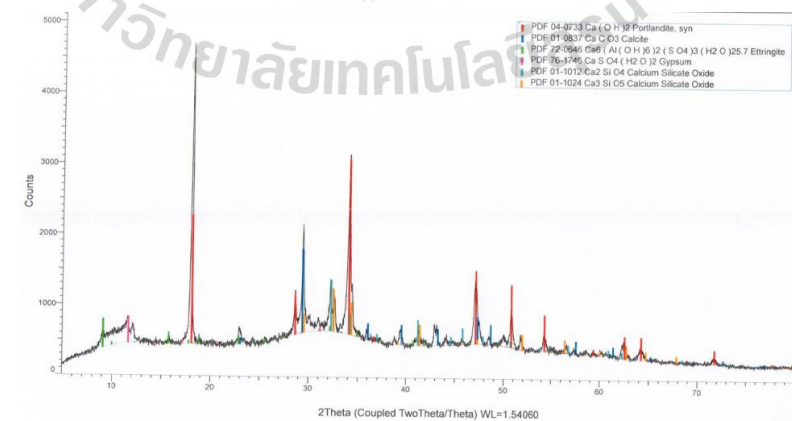
รูปที่ 4.19 และ 4.20 กราฟแสดงตัวอย่างที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.5 อายุบ่ม 28 วัน ในการอธิบายผล XRD ในการเปรียบเทียบ 0% Latex กับ 5% Latex



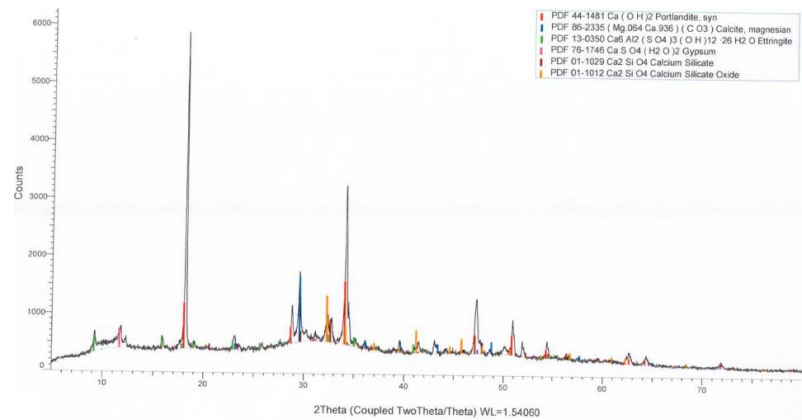
รูปที่ 4.21(a) แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ที่อัตราส่วน w/c = 0.4, 0% Latex



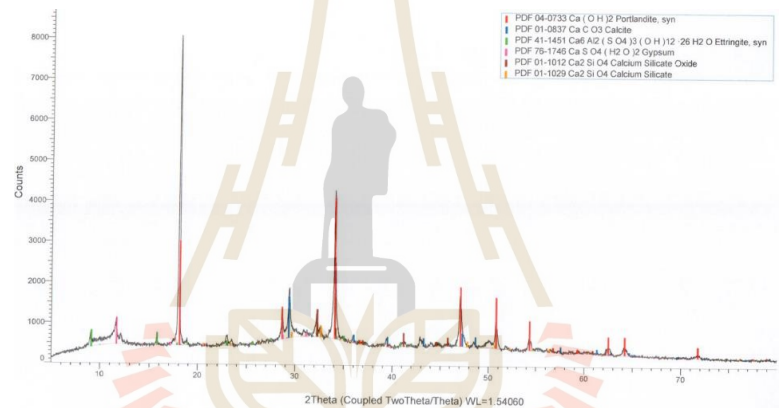
รูปที่ 4.21(b) แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ที่อัตราส่วน w/c = 0.4, 0.5% Latex



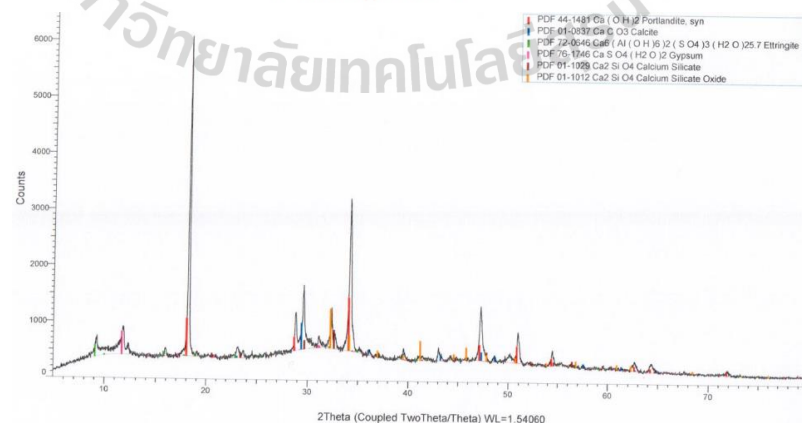
รูปที่ 4.21(c) แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ที่อัตราส่วน w/c = 0.4, 1% Latex



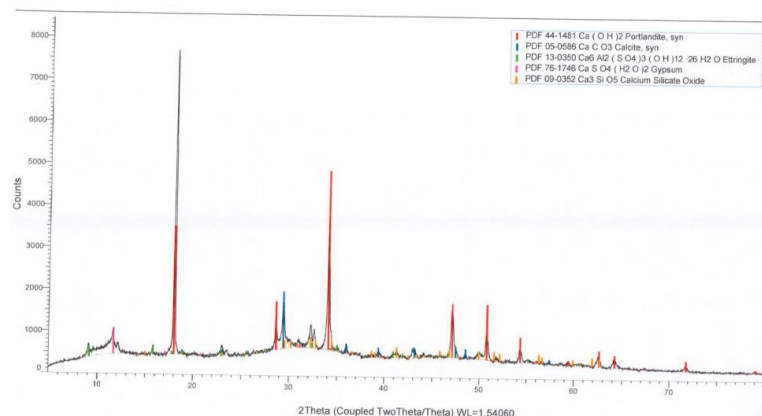
รูปที่ 4.21(d) แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ที่อัตราส่วน w/c = 0.4, 5% Latex



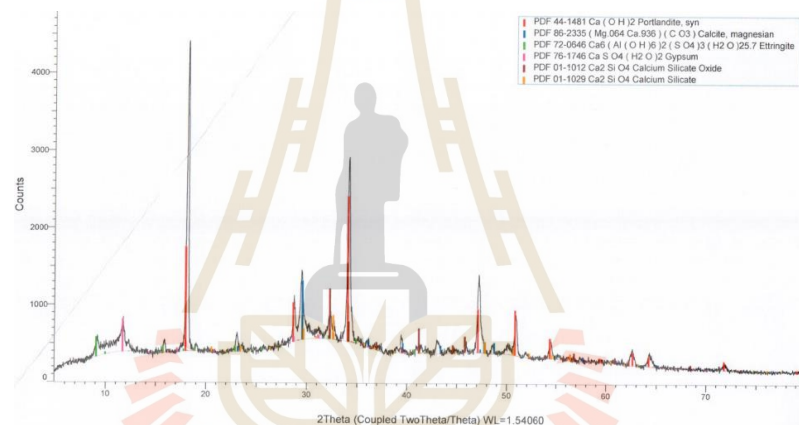
รูปที่ 4.21(e) แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ที่อัตราส่วน w/c = 0.5, 0% Latex



รูปที่ 4.21(f) แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ที่อัตราส่วน w/c = 0.5, 0.5% Latex



รูปที่ 4.21(g) แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ที่อัตราส่วน w/c = 0.5, 1% Latex



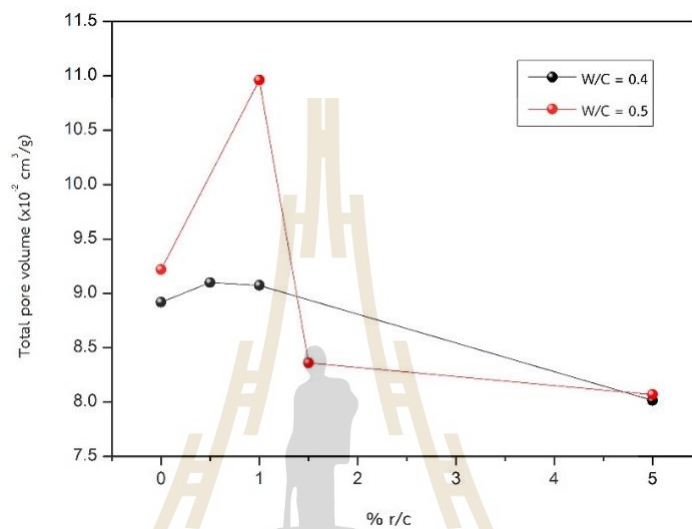
รูปที่ 4.21(h) แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ที่อัตราส่วน w/c = 0.5, 5% Latex

4.3.4 การวิเคราะห์ความพรุน (Pore Size Analyzer)

ผลการวิเคราะห์ความพรุนของตัวอย่าง พบว่า ปริมาณช่องว่างของวัสดุมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วน r/c เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่แสดงในรูปที่ 4.22 จากกราฟที่แสดง total pore volume ทั้ง w/c 0.4 และ w/c 0.5 จะมีช่วงที่มี total pore volume เพิ่มขึ้น ในช่วงอัตราส่วน r/c = 0.5 และ r/c = 1 เนื่องจากมีผลสอดคล้องกับค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นในช่วงนี้ เพราะคอนกรีตที่ผสมน้ำยารพาราในการเติม r/c ที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มค่ากำลังอัดได้ โดยค่ากำลังอัดที่ได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง สามารถนำไปใช้ในการออกแบบก่อสร้างผิวทางคอนกรีตได้ และส่งผลต่อความทนทานของคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยารพารา เนื่องจากการเกิดแผ่นฟิล์มเคลือบป้องกันการแทรกซึมของสารละลายไฮดรอกไซด์ฟลูอิด จึงเป็นช่วงที่ทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น และ

เมื่อเติม r/c เพิ่มมากขึ้น ตั้งแต่ r/c = 1.5 เป็นต้นไป ความหนานก็จะลดลง ค่ากำลังอัดก็จะลดลง และปริมาณรูพรุนก็จะลดลงตามไปด้วย

จากผลการวิเคราะห์ทางโครงสร้างจุลภาคสามารถสรุปได้ว่า อนุภาคยางเป็นสารเติมแต่งทำหน้าที่อุดช่องว่างระหว่างอนุภาคของซีเมนต์ส่งผลให้วัสดุมีความทึบน้ำและสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.22 ปริมาตรของรูพรุน (total pore volume) ของคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัดและกำลังอัดของคอนกรีตผสมน้ำยาพาราบมในน้ำและสารละลายโซเดียมซิลิเฟต การทดสอบกำลังอัดและกำลังอัดทดสอบในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างคอนกรีตผสมน้ำยาพาราเพื่อศึกษาและอธิบายกลไกและหน้าที่ของอนุภาคพาราในโครงสร้างของคอนกรีต จากผลการทดสอบและวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ที่อัตราส่วน w/c และอายุบ่มเดียวกัน ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วน r/c ที่เพิ่มขึ้น สำหรับอิทธิพลของอัตราส่วน w/c ต่อกำลังอัด พบว่ากำลังอัดมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วน w/c เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของอายุการบ่มที่ใช้สำหรับการทดสอบต่อกำลังอัดของคอนกรีต พบว่า กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งการลดลงของกำลังอัดเมื่ออัตราส่วน r/c เพิ่มขึ้น เนื่องจากการผสมยาพารา อนุภาคยาทำให้เกิดแผ่นฟิล์มแทรกตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตและขัดขวางการดูดซึมน้ำสำหรับกระบวนการไฮเดรชันของคอนกรีต

5.1.2 พิจารณาที่อัตราส่วน w/c เดียวกัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน r/c จนกระทั่งถึงอัตราส่วน r/c เหมาะสมที่ทำให้กำลังอัดมีค่าสูงสุด จากนั้น กำลังอัดมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน r/c สำหรับอัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 จะมีค่ากำลังอัดสูงสุดที่อัตราส่วน r/c ร้อยละ 0.58, 1.16 และ 1.73 ตามลำดับ จะเห็นว่า อัตราส่วน r/c ที่เหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน w/c ที่สูงขึ้น

5.1.3 คอนกรีตผสมน้ำยาพาราสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนจากโซเดียมซิลิเฟตได้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา เมื่ออัตราส่วน r/c เพิ่มขึ้นความสามารถในการต้านซิลิเฟตเพิ่มขึ้น

5.1.4 จากผลการวิเคราะห์ทางจุลภาคสามารถสรุปได้ว่า อนุภาคยาไม่ได้มีกลไกที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งอนุภาคยาทำหน้าที่เติมเต็มช่องว่างที่อยู่ในคอนกรีตทำให้คอนกรีตผสมน้ำยาพาราที่มีความทึบน้ำมากขึ้นและสามารถต้านทานซิลิเฟตได้ดีขึ้น

5.1.5 เมื่อมีการเพิ่มปริมาณยาพาราเกินอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดไปแล้ว จะพบว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็น ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะถูกแทนที่ด้วยฟิล์มของน้ำยาพาราธรรมชาติที่มีมากขึ้น ส่งผล ให้น้ำยาพาราธรรมชาติไปหยุดยั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

5.1.6 น้ำยางพาราธรรมชาติเมื่ออยู่ระดับจุลภาคจะมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์ม ซึ่งพบว่าแผ่นฟิล์ม (Para film) ที่ได้จากผลิตภัณฑ์น้ำยางพาราธรรมชาติจะช่วยลดการแตกร้าวในระดับจุลภาค (Micro crack) แผ่นฟิล์มจะเข้าแทรกซึมไปในช่องว่างระหว่างซีเมนต์ส่งผลให้ช่วยการยึดเกาะต้านทานการกร่อนและสึกหรอ จึงเป็นเหตุผลในเรื่องของกำลังอัดแกนเดียวที่ลดลง

5.1.7 การแทรกตัวของแผ่นฟิล์มมีความหนาและบางแตกต่างกันตามปริมาณ r/c ที่ได้เติมผสมในคอนกรีต โดยผลการทดสอบ EDS จะสอดคล้องกับ SEM ที่ระบุได้ว่า องค์ประกอบทางเคมีของ CSH ที่เกิดขึ้นมี C ที่เป็นองค์ประกอบหลัก และมีมากขึ้นเมื่อเติม r/c มากขึ้น เนื่องจากแผ่นฟิล์มยางที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขัดขวางกันดูดซึมน้ำสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปริมาณ C เนื่องจากน้ำยางที่มีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วน r/c ที่เพิ่มขึ้น

5.1.8 ผลจากการทดสอบ XRD ชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างภายในซีเมนต์เฟลต์ไม่มีการมีการเปลี่ยนแปลง ในการวิเคราะห์ เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา (ที่ไม่ได้เติมน้ำยาง) และคอนกรีตที่เติมน้ำพารา ที่ร้อยละ 0.5 , 1 และ 5 ในคอนกรีตธรรมดาพบ สารประกอบ Ca Si และ Al ในปริมาณมากที่สุด แต่ในคอนกรีตผสมน้ำยาง ที่ r/c ร้อยละ 1.16 พบ Ca Si และ Al ลดลงเล็กน้อย แต่พบปริมาณ C ที่สูงขึ้น และคอนกรีตที่ผสมน้ำยาง ที่ r/c ร้อยละ 5.78 พบ Ca Si และ Al ต่ำที่สุด แต่พบปริมาณ C สูงที่สุด อาจสืบเนื่องและวิเคราะห์ผลได้ว่าเกิดผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ลดลงเมื่ออัตราส่วน r/c เพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาในอนาคตควรศึกษาประเภทของน้ำยางพาราที่นอกเหนือจากน้ำยางธรรมชาติ เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของน้ำยางพารารวมถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ากำลังอัดและกำลังดัด เช่น การหาสารผสมเพิ่มเพื่อเพิ่มการยึดเกาะระหว่างน้ำยางพารากับคอนกรีต หรืออิทธิพลของการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มที่มีผลกำลังอัดและกำลังดัด

รายการอ้างอิง

- กฤษฎา กิจเจริญ, การศึกษากำลั่งอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าผสม
น้ำยางพาราปรับสภาพ แก้วลอยจีโอโพลีเมอร์ และปูนซีเมนต์สำหรับงานชั้นพื้นทาง, สาขาวิชา
การบริหารงานก่อสร้างสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ประชุม คำพูน, การใช้น้ำยางพาราปรับปรุงสมบัติด้านการรับกำลังและการเป็นฉนวนกันความร้อน
ของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี,
วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 30 ฉบับที่ 2 เมษายน-มิถุนายน 2550 หน้าที่ 2561
- พงษ์ธร แซ่ฮุย, ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน, 2547, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
พิรวัฒน์ ปลาเงิน, 2559 รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ “การถ่ายทอดเทคโนโลยีประยุกต์ใช้น้ำยางพารา
ในงานบำรุงรักษาระบบชลประทาน” กปจ. 2558/9, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
- สิทธิชัย ศิริพันธุ์, พิทักษ์ บุญนุ่ม, กิจถาวร โลหะ, และอนุรักษ์ กาเนิดว่า, 2548, “การใช้อย่างธรรมชาติ
เพื่อพัฒนาคอนกรีต.” เอกสารการประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, ชลบุรี หน้า
MAT-205-MAT-210
- เสาวณีย์ ก่อวุฒิ กุลรังษี, การผลิตยางธรรมชาติ, 2547, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
- Neville, A.M.; Brooks, J.J.; 1990 Concrete Technology PP.47
- Ohama, Y.; “PRINCIPLE OF LATEX MODIFICATION AND SOME TYPICAL PROPERTIES OF
LATEX-MODIFIED MORTARS AND CONCRETES”, ACI MATERIALS JOURNAL
(November – December 1987), Title No. 84-M45, PP. 511 – 518
- Walters, D. Gerry; “WHAT ARE LATEXES?” CONCRETE INTERNATIONAL: DESIGN
AND CONSTRUCTION, Vol. 9, No. 12 (December 1987), PP. 44 – 47
- Beex LAA, Peerlings RHJ. An experimental and computational study of laminated
paperboard creasing and folding. International Journal of Solids and Structures
2009;46:4192– 4207. doi:10.1016/j.ijsolstr.2009.08.012.



ภาคผนวก ก

บทความวิจัยเต็มรูปแบบในการประชุมวิชาการระดับชาติ

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

พัชรา วงศ์ทอง, ศาตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข (2564). **สมบัติทางวิศวกรรมและโครงสร้าง
จุลภาคของคอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา**. ในการประชุมการเสนอผลงานวิจัย
ระดับชาติ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม ครั้งที่ 4 (The
4 th National Conference in Science and Technology), NCST 4th 2021 ,ประจำปี
การศึกษา 2563 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม, การประชุมวิชาการ
รูปแบบออนไลน์. วันที่ 22 พฤษภาคม 2564. หน้า 560-566



ประวัติผู้เขียน

นางสาวพัชรา วงศ์ทอง เกิดเมื่อวันที่ 7 กรกฎาคม 2536 ณ จังหวัดลพบุรี ศึกษาในระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนเทศบาล 3 วัดคลองสายบัว จังหวัดลพบุรี ศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนเทศบาล 4 ระบบสาธิตเทศบาลเมืองลพบุรี จังหวัดลพบุรี หลังจากสำเร็จการศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 ได้เข้าศึกษาต่อที่ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม ในปี 2559 ได้จบและสำเร็จการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ระดับปริญญาตรี ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร โดยในปี 2560 ได้เข้าทำงานในภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร ในตำแหน่งช่างเทคนิคประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา ทำให้เกิดแรงบันดาลใจที่จะศึกษาหาความรู้เพิ่มเติม และมีแรงจูงใจในการศึกษาต่อในระดับ ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธาและการบริการงานก่อสร้าง สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จากการศึกษาในครั้งนี้ทำให้มีความรู้ ความเข้าใจ ความมานะอดทนและเกิดประสิทธิภาพที่ดีในการต่อยอดองค์ความรู้ ทั้งนี้ได้ส่งบทความเข้าร่วมการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏ จันทรเกษม ครั้งที่ 4 (The 4 th National Conference in Science and Technology : NCST 4th 2021) ประจำปีการศึกษา 2563 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม จัดขึ้นในวันที่ 22 พฤษภาคม 2564 (ในรูปแบบการนำเสนอผ่านระบบออนไลน์) ซึ่งมีประโยชน์นำไปใช้ในอาชีพและการพัฒนาตนเองสืบต่อไป