

กำลังตัดของคอนกรีตตัดแปลงด้วยโพลีเมอร์โดยใช้วัสดุมวลรวมหยาบ
จากคอนกรีตรีไซเคิลและถั่วลย



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2559

กำลังตัดของคอนกรีตตัดแปลงด้วยโพลิเมอร์โดยใช้วัสดุมวลรวมหยาบ
จากคอนกรีตรีไซเคิลและเถ้าลอย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงการ

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

ประธานกรรมการ

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)

(ผศ. ดร.มงคล จิรวรรณเดช)

กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อลงกรณ์ กว้างพินาย : กำลังค้ำของคอนกรีตค้ำแปลงด้วยโพลีเมอร์โดยใช้วัสดุมวลรวม
 หนายบจากคอนกรีตรีไซเคิลและเถ้าลอย (FLEXURAL STRENGTH DEVELOPMENT OF
 POLYVINYL ALCOHOL AND FLY ASH MODIFIED CONCRETE BY USING
 RECYCLED CONCRETE AGGREGATE (RCA) AS COARSE AGGREGATE)
 อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุชนันต์ หอพิบูลสุข

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังค้ำของคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิล (RCA) เป็นมวลรวมหนายบ
 ปรับปรุงด้วยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และเถ้าลอย (FA) การพัฒนากำลังค้ำของคอนกรีตถูก
 วิเคราะห์โดยใช้ภาพถ่ายกำลังสูง (SEM) ผลการทดสอบพบว่ากำลังค้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม
 ทุกอายุบ่ม กำลังค้ำของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PVA จนถึงปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0
 หลังจากนั้นกำลังค้ำมีค่าลดลงเมื่อ PVA มีปริมาณเพิ่มขึ้น ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่า การใช้เถ้า
 ลอยร่วมกับปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงค้ำของตัวอย่างในระยะยาวได้ (อายุ
 บ่ม 28 และ 60 วัน) โดยที่ อัตราส่วน FA/c ที่เหมาะสมคือ 20/80 การแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ใน
 ปริมาณที่มากเกินไป (FA/c เท่ากับ 30/70) ทำให้มีเถ้าลอยส่วนเกินซึ่งไม่สามารถทำปฏิกิริยาปอซ
 โซลานิก ส่งผลให้กำลังค้ำของตัวอย่างมีค่าลดลง งานวิจัยนี้ช่วยยืนยันศักยภาพของการใช้โพลีไ
 วนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และเถ้าลอย (FA) ในการปรับปรุงคุณสมบัติการรับแรงค้ำทั้งในระยะสั้น
 และระยะยาวของคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิลเป็นมวลรวมหนายบ

ALONGKORN KWANGPIMAI : FLEXURAL STRENGTH
DEVELOPMENT OF POLYVINYL ALCOHOL AND FLY ASH
MODIFIED CONCRETE BY USING RECYCLED CONCRETE
AGGREGATE (RCA) AS COARSE AGGREGATE. ADVISOR : PROF.
SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., P.E.

This research studies the flexural strength development of polyvinyl alcohol-fly ash (PVA-FA) modified Recycled Concrete Aggregate (RCA)-concrete. The flexural strength development is analyzed via Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis. The results show that the flexural strength of PVA-FA modified RCA-concrete increases with time. For a particular curing time, and fly ash/cement (FA/c) ratio, flexural strength increases with increasing PVA content up to the maximum flexural strength at PVA = 1% then the flexural strength decreases with increasing PVA content. Test results also show that FA can improve long-term (28 and 60 days of curing) flexural strength of concrete. The FA reacts with available lime and alkali in concrete, producing additional cementitious compounds. The maximum flexural strength is observed at FA/c = 20/80. However, the reduction of flexural strength was observed at FA/c = 30/70. This research confirms the potential of using PVA and FA for the improvement short-term and long-term flexural strengths of concrete using RCA as coarse aggregate.

School of Civil Engineering
Academic Year 2016

Student's Signature _____
Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์อย่างสูงจากคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้วิจัยขอกราบขอบคุณเป็นอย่างยิ่ง

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานวิจัย ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจทานเนื้อหาของงานวิจัยจนสมบูรณ์แบบ

นายธีรศักดิ์ เขาวราช ผู้ช่วยอาจารย์ที่ปรึกษา ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลของงานวิจัยนี้และช่วยเหลือ ด้านวิชาการ การทดลองงานวิจัย แนะนำ และช่วยตรวจทานเนื้อหาข้อมูลโครงงานวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์

คณาจารย์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ หลักสูตร บริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำ

ขอขอบคุณผู้ประสานงานหลักสูตรบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภคทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือประสานงานในด้านวิชาการ และด้านกิจกรรมต่าง ๆ

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในหลักสูตรบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค และ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้ความร่วมมือช่วยเหลือ และคำปรึกษาในโครงงานวิจัยนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาผู้ให้กำเนิด อบรม เลี้ยงดู และส่งเสริม การศึกษาด้วยดีตลอดมาโดยไม่หวังสิ่งอื่นใด ผู้วิจัยขอมอบบูชาพระคุณบิดา มารดา ตลอดจนผู้มี พระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือ และขอน้อมบูชาบูรพาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ ประสาทความรู้ด้วยความรักและความเมตตา

อลงกรณ์ กว้างพิมาย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	4
2.2.2 วัสดุพอซโซลาน.....	7
2.2.3 เถ้าลอย.....	8
2.2.4 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	9
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	18
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	18
3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา.....	18
3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง.....	18
3.2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดลอง.....	19
3.2.3 มาตรฐานการทดสอบกำลังต้านทานแรงคดของคอนกรีต.....	21

3.2.4	การทดสอบกำลังต้านทานแรงค้ำของคอนกรีต	22
3.2.5	ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังค้ำของคอนกรีต	23
4	ผลการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูล	25
4.1	คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา	25
4.1.1	ความถ่วงจำเพาะ	25
4.1.2	ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา	25
4.1.3	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา	26
4.2	กำลังค้ำของคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบ (RCA) ปรับปรุงด้วยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และเถ้าลอย (FA)	27
4.2.1	ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างคอนกรีตที่ 7 วันและส่วนผสมของเถ้าลอยในอัตราร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ	27
4.2.2	ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างคอนกรีตที่ 28 วันและส่วนผสมของเถ้าลอยในอัตราร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ	31
4.2.3	ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างคอนกรีตที่ 60 วันและส่วนผสมของเถ้าลอยในอัตราร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ	35
4.3	ภาพถ่ายกำลังสูงของอนุภาคตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง โดยวิธี SEM และ EDX (Scanning Electronic Microscope and Energy-dispersive X-ray spectroscopy)	39
4.3.1	ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 ปริมาณ PVA ร้อยละ 0 1.0 และ 2.0 ที่อายุบ่ม 60 วัน	39
4.3.2	ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 20/80 ปริมาณ PVA ร้อยละ 0 1.0 และ 2.0 ที่อายุบ่ม 60 วัน	41
4.3.3	ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70 ปริมาณ PVA ร้อยละ 0 1.0 และ 2.0 ที่อายุบ่ม 60 วัน	44
5	สรุปผล และข้อเสนอแนะ	47
	เอกสารอ้างอิง	48
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก การคำนวณหาความเค้นและความเครียดของคอนกรีต	51
	ประวัติผู้เขียน	53

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนผสมของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้.....	12
3.1 อัตราส่วนผสมและระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต.....	20
3.2 อธิบายอัตราส่วนผสมของการผสมคอนกรีตสำหรับใช้ในการหล่อตัวอย่าง โดยใช้อัตราส่วนอยู่ที่ ปูน 1.2 : ทราย 2.4 : RCA 3.4.....	20
4.1 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	25
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย.....	27



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	9
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดซีเมนต์เพสต์ ปอร์ตแลนด์ต่อปริมาณของพอลิเมอร์ของอัตราส่วนที่แตกต่างกัน.....	12
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตต่ออัตราส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ 0.35.....	13
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาเครชันต่ออัตราส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ 0.35.....	14
2.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์เมื่อเติมโพลิไวนิลโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ 0.35 โดยที่รูป (a) เติม PVA ที่ร้อยละ 0 (b) เติม PVA ที่ร้อยละ 1.4 (c) เติม PVA ที่ร้อยละ 2.8 (d) เติม PVA ที่ร้อยละ 4.0.....	15
2.6 สัญลักษณ์ภายในรูปและขั้นตอนการผสมคอนกรีตแบบ Two Stage Mixing Approach (TSMA).....	16
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้การผสมแบบดั้งเดิมและคอนกรีตที่ใช้การผสมแบบ Two Stage Mixing Approach (TSMA).....	16
3.1 แบบหล่อที่ใช้การการทดลอง.....	18
3.2 แผนผังขั้นตอนการผสมคอนกรีตโดยวิธี two-stage mixing approach (TSMA).....	19
3.3 การทดสอบวิธีใช้แรงกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลาง.....	22
3.4 การทดสอบวิธีใช้แรงกดสอง.....	22
4.1 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 3,500 เท่าของ (ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) เถ้าลอย (Fly ash).....	26
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดัดต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน และอัตราส่วน FA/c = 10/90 ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	27
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดัดต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน และอัตราส่วน FA/c = 20/80 ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	28

4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงคดต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน และอัตราส่วน FA/c = 30/70 ที่อายุบ่ม 7 วัน	29
4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคดต่อปริมาณ PVA ที่อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 20/80 และ 30/70 ที่อายุบ่ม 7 วัน	30
4.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงคดต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน และอัตราส่วน FA/c = 10/90 ที่อายุบ่ม 28 วัน	31
4.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงคดต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน และอัตราส่วน FA/c = 20/80 ที่อายุบ่ม 7 วัน	32
4.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงคดต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน และอัตราส่วน FA/c = 30/70 ที่อายุบ่ม 28 วัน	33
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคดต่อปริมาณ PVA ที่อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 20/80 และ 30/70 ที่อายุบ่ม 28 วัน	34
4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงคดต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน และอัตราส่วน FA/c = 10/90 ที่อายุบ่ม 60 วัน	35
4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงคดต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน และอัตราส่วน FA/c = 20/80 ที่อายุบ่ม 60 วัน	36
4.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงคดต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน และอัตราส่วน FA/c = 30/70 ที่อายุบ่ม 60 วัน	37
4.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคดต่อปริมาณ PVA ที่อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 20/80 และ 30/70 ที่อายุบ่ม 60 วัน	38
4.14	(ก) รูป SEM ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 (ข) กราฟ EDX ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 0 และ อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90	39
4.15	(ก) รูป SEM ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 (ข) กราฟ EDX ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 และ อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90	40
4.16	(ก) รูป SEM ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 (ข) กราฟ EDX ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 และ อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90	41

4.17 (ก) รูป SEM ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 20/80 (ข) กราฟ EDX ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 0 และ อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 20/80	42
4.18 (ก) รูป SEM ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 20/80 (ข) กราฟ EDX ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 และ อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 20/80	42
4.19 (ก) รูป SEM ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 20/80 (ข) กราฟ EDX ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 และ อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 20/80	43
4.20 (ก) รูป SEM ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70 (ข) กราฟ EDX ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 0 และ อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70	45
4.21 (ก) รูป SEM ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70 (ข) กราฟ EDX ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 และ อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70	45
4.22 (ก) รูป SEM ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70 (ข) กราฟ EDX ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 และ อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70	46

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

มอก.	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
RCA	Recycled Concrete Aggregate
PVA	Polyvinyl Alcohol
ASTM	American Society for Testing
ACI	American Concrete Institute
C ₃ S	Tricalcium Silicate
C ₂ S	Dicalcium Silicate
C ₃ A	Tricalcium Aluminate
C ₄ AF	Tetracalcium Alumino Ferrite
CaO	Calcium Oxide
SiO ₂	Silicon Dioxide
Al ₂ O ₃	Aluminium Oxide
Fe ₂ O ₃	Ferric Oxide
Mgo	Magnesium Oxide
Na ₂ O	Sodium Oxide
SO ₃	Sulfur Trioxide
Ca(OH) ₂	Calcium Hydroxide
CAH	Calcium Aluminate Hydrates
TSMA	Two stage mixing approach
UTM	Universal Testing Machine

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัจจุบันถนนในประเทศไทยมีด้วยกัน 2 ประเภท คือ ถนนลาดยาง และถนนคอนกรีต ปัจจุบันประเทศไทยมีการก่อสร้างที่ขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ทำให้การใช้ทรัพยากรมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดมีจำนวนที่ลดลงอย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะเป็นหินที่ใช้ในการเป็นมวลรวมหยาบหรือแม้กระทั่งหินปูนที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงทำให้มีการเพิ่มสัมปทานในการผลิตหินมวลรวมหยาบและหินปูนในการผลิตปูนซีเมนต์ด้วยเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมากถึง 0.5 ตันในทุกๆ 1 ตันของน้ำหนักปูนซีเมนต์ส่งผลให้เกิดภาวะเรือนกระจก ภาวะโลกร้อนเกิดขึ้น หากพิจารณาประโยชน์ในการใช้วัสดุทดแทน โดยเฉพาะวัสดุที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่างๆ ย่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงทำให้มีแนวคิดในการนำวัสดุรีไซเคิลมาใช้ในการก่อสร้าง โดยการผ่านกระบวนการแปรสภาพให้นำกลับมาใช้ได้อีกครั้ง เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากำลังค้ำของคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบ (Recycle Concrete Aggregate) ปรับปรุงด้วยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol) และเถ้าลอย (Fly Ash) ซึ่งมวลรวมหยาบจากคอนกรีตรีไซเคิล (Recycle Concrete Aggregate) นี้ได้จากการทุบทำลายตึก อาคาร บ้านเรือน ถนนคอนกรีต หรือเศษคอนกรีตที่ไม่ได้ใช้แล้วมาเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตแทนหินแกรนิต ซึ่งเป็นการลดหินจากธรรมชาติส่งผลให้ยืดยาวระยะเวลาในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ยาวนานมากยิ่งขึ้นแล้วยังสามารถช่วยในการลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตให้ลดลงได้ เนื่องจากคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) มีคุณสมบัติบางประการที่ดีน้อยกว่าหินแกรนิตจากธรรมชาติส่งผลทำให้เมื่อนำมาใช้ในการผสมคอนกรีตเพื่อนำไปใช้งานถนนทำให้คุณสมบัติที่ได้ไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่ต้องการ จึงจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงเพื่อให้เทียบเท่าข้อกำหนดของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท

ปัจจุบันนี้มีการคิดค้นนำโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ซึ่งโพลีไวนิลแอลกอฮอล์นี้เป็นสารประกอบตั้งต้นของกระบวนการผลิตกาวยาเท็กซ์ มาใช้ในการผสมกับคอนกรีตเพื่อพัฒนาคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น โดย โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ดังกล่าวเมื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ ทราย และวัสดุมวลรวมหยาบจากคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) จะช่วยทำให้คอนกรีตเกาะตัวกันเหนียวแน่นขึ้น ทำให้คอนกรีตรับกำลังแรงค้ำได้มากขึ้นและช่วยป้องกัน

การวิบัติเนื่องจากการค้ำตัวของคอนกรีตได้ดีขึ้นและยังช่วยเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนจาก กรด เบสได้ดีขึ้น ข้อดีของวัสดุ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ดังกล่าว ทำให้มีแนวโน้มที่จะถูกพัฒนา นำมาใช้ในปริมาณมากขึ้น ในด้านของข้อเสียเมื่อนำวัสดุโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) มาผสมกับ คอนกรีต จะทำให้เกิดช่องว่างในคอนกรีตมากขึ้น เนื่องจากโพลีไวนิลแอลกอฮอล์นั้นเพิ่มความหนืด ของน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ส่งผลให้เกิดฟองอากาศในคอนกรีตขณะผสมมากขึ้น ซึ่งเป็น สาเหตุหลักที่ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงจึงจำเป็นต้องหาจุดที่ดีที่สุดในการเติมโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เพื่อให้คอนกรีตสามารถรับแรงดัดได้ดีขึ้น แล้วในการทดลองในครั้งนี้ยัง มีการนำวัสดุผสมเพิ่มเข้าไปในการผสมคอนกรีตนี้เพิ่มอีกหนึ่งชนิดได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash) ซึ่งเถ้า ลอยนี้เมื่อนำมาผสมกับคอนกรีตทำให้ช่องว่างที่เกิดในคอนกรีตมีจำนวนลดลง ส่งผลให้คอนกรีตมี กำลังอัดในระยะยาวมีเพิ่มมากขึ้น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตเพราะคอนกรีตมีการใช้น้ำที่ น้อยลง ในขณะที่เดียวกันก็ไม่ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่ำกว่าค่ามาตรฐานงานทางของกรม ทางหลวงและทางหลวงชนบท

การพัฒนาการค้ำตัวของคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบ (RCA) ปรับปรุง ด้วยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และเถ้าลอย (Fly Ash) เป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ ให้เกิดประโยชน์สูงสุดทำให้งานประเภท ถนน คลองส่งน้ำ และงานที่เกี่ยวกับสารเคมี มีคุณภาพที่ดี ขึ้น ซึ่งคอนกรีตรีไซเคิลนี้อาจมีคุณสมบัติบางประการที่ดีกว่าการใช้หินแกรนิตเพียงประเภทเดียว การศึกษาในครั้งนี้จึงสามารถนำไปพัฒนาให้มีประสิทธิภาพต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุมวลรวมหยาบจากคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Concrete Aggregate)
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการพัฒนาการค้ำรับแรงดัด และการแอ่นตัวของคอนกรีตที่เติมสาร โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และเถ้าลอย (Fly Ash)
- 1.2.3 เพื่อศึกษาและหาค่าของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ที่เหมาะสม ในการ พัฒนากำลังรับแรงดัดของคอนกรีต

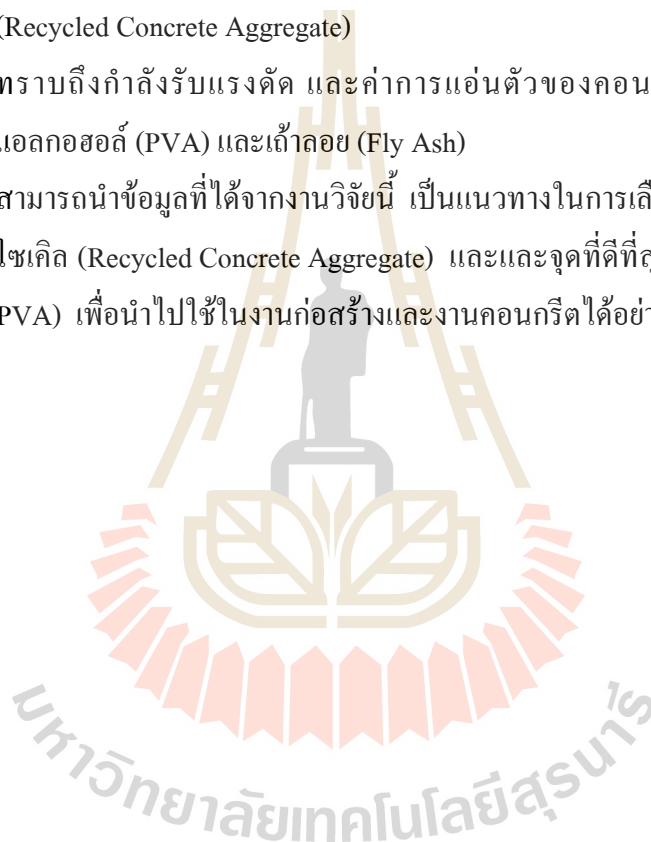
1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษาการค้ำรับแรงดัดและความยืดหยุ่นของคอนกรีตดัดแปลงด้วย โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และเถ้าลอย (Fly Ash) วัสดุมวลรวมหยาบจากคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Concrete Aggregate) แทนที่หินจากธรรมชาติทั้งหมด

- 1.3.2 หากำลังรับแรงค้ำสูงสุดของคอนกรีตค้ำแปลงด้วยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) โดยใช้วัสดุมวลรวมหยาบจากคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Concrete Aggregate) จากการทดสอบหากำลังรับแรงค้ำสูงสุด โดยหน่วยแรงค้ำสูงสุดจะอยู่บริเวณท้องคาน และวัดค่าความยืดหยุ่นของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุมวลรวมหยาบจากคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Concrete Aggregate)
- 1.4.2 ทราบถึงหากำลังรับแรงค้ำ และค่าการแอ่นตัวของคอนกรีตเมื่อเติมโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และเถ้าลอย (Fly Ash) สามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ เป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุมวลรวมหยาบจากคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Concrete Aggregate) และและจุดที่ดีที่สุดในการเติมวัสดุโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เพื่อนำไปใช้ในงานก่อสร้างและงานคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การศึกษากำลั้ดัดของคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิล (RCA) เป็นมวลรวมหยาบปรับปรุงด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และเถ้าลอย (Fly Ash) เป็นการนำทรัพยากรที่ไม่ได้ใช้งานแล้วนำไปผ่านกระบวนการแปรสภาพ แล้วนำกลับมาใช้ได้ อีก และเติมสารพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เข้าไปเพื่อพัฒนาคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผงที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้จากการเผาส่วนผสมซึ่งประกอบด้วยหินปูน (Calcareous) ดินเหนียวประเภท Argillaceous ออกไซด์ ของ ซิลิกา อลูมินา และเหล็ก แล้วนำมาบดเป็นผงละเอียด

1) ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีหลายประเภท แต่ละประเภทมีสารประกอบสำคัญได้แก่ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF ซึ่งจะมีอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน จึงทำให้ปูนซีเมนต์แต่ละประเภทมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ส่วนประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ชนิดต่างๆ ซึ่งตามมาตรฐาน มอก. 15 ของไทยได้แบ่งปูนซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

ก. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) ใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไปปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังในระยะเวลาไม่รวดเร็วมากนัก และให้ความร้อนปานกลาง

ข. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 2

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 2 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนไม่สูงมากนัก ความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 และให้กำลัง

ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์ใดที่เกิดความร้อนและทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตปานกลาง

ค. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 3

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 3 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (Rapid Hardening Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรก ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงเพราะมี C3S และความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาก ใช้ในการทำคอนกรีตที่ต้องการใช้งานหรือถอดแบบเร็ว

ง. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 4

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 4 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำมากเพราะมีปริมาณ C3S ต่ำ แต่ปริมาณ C2S ที่ค่อนข้างสูง ใช้ในงานคอนกรีตหนา เนื่องจากมีคุณสมบัติให้อุ่นหุ้มมิดำ

จ. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulfate Resisting Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีปริมาณ C3A ต่ำมาก ดังนั้นจึงมีการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยลง ใช้ในงานคอนกรีตที่สร้างอยู่ในที่มีเกลือหรือสารละลายซัลเฟตและบริเวณที่มีดินเค็ม

2) องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยออกไซด์หลักและออกไซด์รอง ตามรายละเอียดดังนี้

ก. ออกไซด์หลัก (Major oxides)

ออกไซด์หลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกินไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ออกไซด์กลุ่มนี้มีปริมาณรวมกันได้กว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ข. ออกไซด์รอง (Minor oxiders)

ออกไซด์รอง ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na_2O) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)

3) สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์

ออกไซด์ของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมี และรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีรูปร่างต่าง ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบการเผา และการเย็นตัวของเม็ดปูน ปริมาณ

สารประกอบสำคัญในปูนซีเมนต์มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ สารประกอบที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด ดังนี้

ก. ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ หรือ C_3S)

ไตรแคลเซียมซิลิเกต เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึกสี่เหลี่ยม คุณสมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกตนี้เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัว และแข็งตัวให้กำลังค่อนข้างดีโดยเฉพาะ 7 วันแรก โดยปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 45 ถึง 55

ข. ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ หรือ C_2S)

ไดแคลเซียมซิลิเกตมีหลายรูปแบบ โดยที่อุณหภูมิปกติ C_2S จะอยู่ในรูปแบบไดแคลเซียมซิลิเกต ($\beta\text{C}_2\text{S}$) ไดแคลเซียมซิลิเกตมีลักษณะเป็นเม็ดกลม มีคุณสมบัติเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดการก่อตัวและพัฒนากำลังอัดอย่างค่อนข้างช้าและช้ากว่า C_3S มาก แต่ในระยะยาวจะให้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S โดยปริมาณไดแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 15 ถึง 35

ค. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ หรือ C_3A)

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมสี่เหลี่ยม ทำปฏิกิริยากับน้ำมีความรุนแรงมากและทำให้ก่อตัวทันที (Flash Set) การพัฒนากำลังเร็วภายใน 1 ถึง 2 วัน แต่กำลังค่อนข้างต่ำ ปริมาณเมื่อเทียบกับ C_3S และ C_2S โดยปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 7 ถึง 15

ง. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ หรือ C_4AF)

เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์อยู่ในสภาพสารละลายแข็ง (Solid Solution) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็วภายในไม่กี่นาที แต่กำลังค่อนข้างต่ำ และต่ำกว่า C_3A โดยปริมาณของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 5 ถึง 10

4) ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

ก. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide)

ข. ปฏิกริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะ
ได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH

ค. ปฏิกริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด
และให้เฟสก่อตัวอย่างรวดเร็ว

ง. ปฏิกริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับ
ปฏิกิริยาของ C3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำให้ปฏิกิริยา
จะเกิดขึ้นช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซัม

2.2.2 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอน
ออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) หรือเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันเป็นปริมาณไม่
ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุนั้น ๆ อาจจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้
แต่ต้องสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของ
แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และถึงแม้ว่า ปอซโซลาน
ชนิดนั้นมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ในสัดส่วนผสมใด ๆ ก็ตาม บางครั้งปอซโซ
ลานบางส่วนไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้เนื่องจากองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยามีไม่
เพียงพอต่อขบวนการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

1) ชนิดของวัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลาน มี 2 ชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Pozzolan)
และปอซโซลานดัดแปลง (Modify pozzolan) มีรายละเอียดดังนี้

ก. ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ได้แก่
หินดินดาน (Shales) เศษหินภูเขาไฟ (Tuff) หินภูมิไซต์ (Pumisite) หินโอเพิลเลื่อง (Opaline) หิน
ชั้น (Shate) หินปูน (Limestone) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เมื่อต้องการนำไปใช้งาน
จะต้องนำมาบดก่อน

ข. ปอซโซลานดัดแปลง (Modify Pozzolan)

ปอซโซลานดัดแปลงเกิดจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็น
ผลพลอยได้ หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่าน

ขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้นซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบันปอซโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า

2) ปฏิกริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) หรือแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction)

2.2.3 เถ้าลอย (Fly Ash)

1) ลักษณะของเถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly Ash) คือเถ้าที่หลงเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินหรือลิกไนต์ มีขนาดเล็กและละเอียดมากโดยทั่วไปไปกับก๊าซร้อนออกจากปล่องควันของโรงผลิตไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง เถ้าลอยซึ่งจะถูกดักจับโดยเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตย์ เพื่อไม่ให้หลุดออกไปเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม คุณสมบัติของเถ้าลอยนั้นเมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดในระยะยาว เพิ่มความทนทานของคอนกรีตเนื่องใช้น้ำน้อยลงและทำให้ช่องว่างในเนื้อคอนกรีตลดลง ส่วนข้อเสียของเถ้าลอยนั้นเนื่องจากเถ้าลอยนั้นไม่สามารถควบคุมคุณภาพได้ยากเนื่องจากเป็นของเสียที่ได้จากโรงไฟฟ้า และไม่เหมาะสมกับงานคอนกรีตที่ต้องการกำลังรับแรงอัดในระยะเวลาด้านเนื่องจากเถ้าลอยนั้นมีการทำปฏิกิริยาที่ช้า

2) องค์ประกอบทางโครงสร้างของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางโครงสร้างของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่ทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ไออนอนออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักและมี แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล ($\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}$) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition : LOI) SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักมีปริมาณถึงร้อยละ 80-90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน มาตรฐาน

ASTM C618 กำหนดผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ของเถ้าลอยไว้อย่างต่ำร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้งานได้

3) การนำเถ้าลอยมาประยุกต์ใช้

เถ้าลอย (Fly Ash) ซึ่งเถ้าลอยนี้เมื่อนำมาผสมกับคอนกรีตทำให้ช่องว่างที่เกิดในคอนกรีตมีจำนวนลดลง ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดในระยะยาวมีเพิ่มมากขึ้น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตเพราะคอนกรีตมีการใช้น้ำที่น้อยลง

2.2.4 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol, PVA)

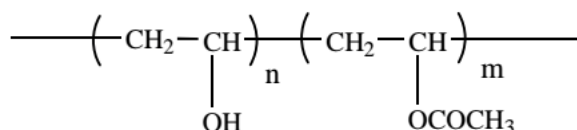
1) ลักษณะของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์

โพลีไวนิลโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีคุณสมบัติพิเศษคือสามารถย่อยสลายได้โดยวิธีชีวภาพ และติดไฟได้คล้ายกระดาษ นอกจากนี้ยังสามารถละลายในน้ำได้ การใช้งานของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ อาศัยคุณสมบัติการละลายในน้ำ เช่น ใช้เป็นตัวช่วยทำให้ระบบอัดขึ้น และแขวนลอยต่างๆ และใช้ทำแผ่นฟิล์มเคลือบกระดาษ ซึ่งมีความใสเหนียว และทนต่อการขีดข่วน และ นำโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ไปทำปฏิกิริยาเคมีให้ไม่สามารถละลายแล้วจึงนำมาใช้งาน โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่ละลายในน้ำนี้สามารถดูดน้ำและความชื้นได้เป็น อย่างดี (ประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก) จึงสามารถคงรูปได้ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ไม่มีกลิ่นและไม่มีรส มีการให้แสงผ่านได้น้อย มีสีขาวหรือครีมลักษณะเป็นผงเกล็ด โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ไม่ใช่ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

ส่วนใหญ่แล้วสารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 5 จะมีค่า pH อยู่ในช่วง 5.0-6.5 มีจุดหลอมเหลว 180-190 องศาเซลเซียสมีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 26,300-30,000 และระดับของการไฮโดรไลซิสร้อยละ 86.5-89

2) องค์ประกอบทางโครงสร้างของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์

โครงสร้างของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Partially Hydrolyzed) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์

3) การนำโพลีไวนิลแอลกอฮอล์มาประยุกต์ใช้

โพลีไวนิลแอลกอฮอล์สามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลายในอุตสาหกรรม ใช้เป็นตัวช่วยยึดเกาะและเคลือบผิว ซึ่งจะถูกใช้เป็นฟิล์มเคลือบผิวโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้งานที่

ซึ่งต้องการคุณสมบัติในการป้องกันความชื้น ความเหนียวของโพลิไวนิลแอลกอฮอล์นั้นทำให้สามารถประยุกต์ใช้เป็นตัวช่วยในการเคลือบรูปแบบอื่นๆซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะใช้งานที่เกี่ยวกับของแข็ง

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นจะกล่าวถึง คุณสมบัติของปูนซีเมนต์เพสต์ปอร์ตแลนด์ คุณสมบัติของคอนกรีต และคุณสมบัติของโพลิไวนิลแอลกอฮอล์

อดิญา ดันเจริญ (2557) งานวิจัยนี้ศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วนด้วยเถ้าขานอ้อย เพื่อผลิตเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอร์ตโซลาน เนื่องจากปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี และกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมากและทำให้เกิดภาวะโลกร้อนได้ ดังนั้นจึงนำวัสดุปอร์ตโซลานมาทำการผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อลดสภาวะโลกร้อน วัสดุที่นำมาผสมได้แก่ เถ้าขานอ้อย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมทางการเกษตรมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน โดยนำมาแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 และ 20 โดยน้ำหนัก บ่มไว้ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

ขงยุทธ วัฒนกุล (2554) ศึกษาคุณสมบัติทางด้านซีเมนต์และการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงปูนขาวในส่วนผสมของคอนกรีต เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้เถ้าลอยและผงปูนขาวอย่างเหมาะสม ทำการศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ ระยะเวลาในการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัวของคอนกรีต ความพรุนของคอนกรีต กำลังอัดประลัยของคอนกรีต และความต้านทานซัลเฟต โดยการหาค่าการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต เมื่อมีการสัมผัสของสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายที่ผสมทั้งโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ซัลเฟตที่สามารถพบมากในธรรมชาติ และเป็นอันตรายต่อคอนกรีต ได้แก่ โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต และแคลเซียมซัลเฟต การศึกษาในครั้งนี้เพื่อใช้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการออกแบบอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยและผงปูนขาว เพื่อให้คอนกรีตที่ได้ทำการออกแบบสามารถนำไปใช้งานโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

สุรสิทธิ์ เนาะบุญ และ ปิติศานต์ กร้ามาตร ศึกษาผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูน โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 สูง 30 ซม. ทำการศึกษาที่ความละเอียด 2,8 และ 15 ไมครอนด้วยวิธีเบลน โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 5 10 และ 20 ร่วมกับเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 25 และ 30 ทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของ เถ้าลอย ผงปูนขาว ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพ

ประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะ และคุณสมบัติทางกลได้แก่ กำลังอัดประลัย กำลังดึงแบบผ่าซีก และ โมดูลัสยืดหยุ่น ซึ่งคอนกรีตที่ผสมผงปูนขาวและเถ้าลอยทำให้ประสิทธิภาพของกำลังอัดประลัย และกำลังดึงแบบผ่าซีกในระยะยาวมีค่าสูงขึ้น

ปีติสานต์ กร้ามาตร (2553) ศึกษาความต้องการน้ำและการก่อตัวของตัวอย่างเพสต์ ค่า การไหลแผ่ ความพรุน ค่าการหดตัวแห้ง และกำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ตาร์ และกำลังอัด ประลัยของตัวอย่างคอนกรีต มีการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่ม มากขึ้น เป็นที่ทราบกันดีว่าในการผลิตปูนซีเมนต์ด้วยเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันก่อให้เกิดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์มากถึง 0.5 ตันในทุก ๆ 1 ตันของน้ำหนักรปูนซีเมนต์ที่ผลิตขึ้น หากพิจารณา ประโยชน์จากการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์โดยเฉพาะกรณีวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่างๆ ย่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมการ ผลิตปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตและพัฒนาคุณสมบัติบางประการของ คอนกรีตให้ดีขึ้น รวมทั้งสามารถแก้ปัญหาการกำจัดของเสียและช่วยประหยัดพลังงานโดยรวมของ ประเทศ อาทิเช่น พลังงานที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ พลังงานที่ใช้ลำเลียงผล ผลิตได้ไปทิ้งในบ่อกลบฝัง พลังงานที่ใช้ในการระเบิดภูเขาหินปูน และพลังงานที่ใช้ในการย่อย หินเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น

สาโรจน์ คำรังสี (2558) ศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าแกลบและเถ้าลอยต่อคุณสมบัติ เเชิงกลของคอนกรีตโดยมีตัวแปรในการศึกษาคือปริมาณเถ้าแกลบผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 30 และร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยทำการทดสอบหาค่ากำลังอัดของ คอนกรีตที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างทดสอบประเภทคานมีขนาดเท่ากับ $7.5 \times 7.5 \times 35.0$ เซนติเมตร กำหนดให้ค่าความยุบตัวของคอนกรีต (Slump) อยู่ในช่วง $7.5 + 2.5$ เซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าการ ยุบตัวเป็นคอนกรีตที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคารทั่วไป หลังจากการหล่อตัวอย่างจนมีอายุ ครบ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบไปบ่มในน้ำจนกระทั่งคอนกรีตครบอายุทดสอบ ที่ 7 28 และ 90 วันการ ทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 78

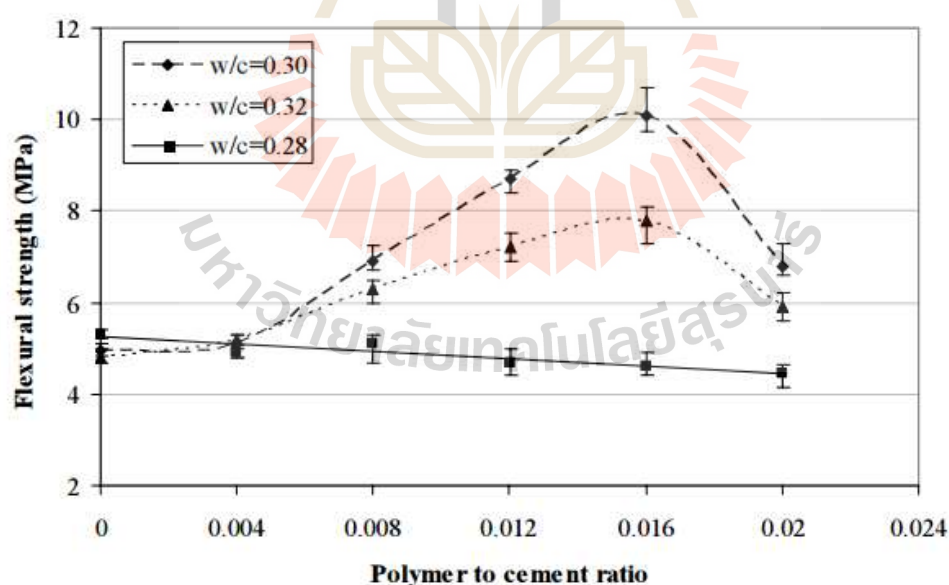
Viswanath (2007) ศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ เมื่อนำโพลิไวนิลแอลกอฮอล์มา ผสม โพลิไวนิลแอลกอฮอล์นี้เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่มีสารพิษ และละลายน้ำได้ เมื่อผสมเข้า ไปในคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในการทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี กรด – เบส น้ำมัน และตัวทำละลายได้ดี ทำให้คอนกรีตมีความต้านทานแรงดัดและแรงดึงและมีความยืดหยุ่นสูง

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมของโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้

Ingredients	Types	Percentage by mass
Phenol formaldehyde resin	1:2.75	5,7.5,10,12.5,15
PVAL solution (1%)	MolWt = 14,000	0.5,1,1.5,2
Borax as saturated solution in water (5.1g in 100 ml of water)		5 ml
Portland cement	Fly ash based pozzolana	100
Accelerator, calcium chloride	Fused	0.1

จากตารางแสดงส่วนผสมของโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ พบว่าโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ส่วนมากจะเติมเข้าไปในปริมาณร้อยละ 0.5 ถึง 1.5-2 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ค่าต่างๆ พบว่าโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เหมาะสมมีค่าแตกต่างกันไปตามแต่ละอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ซึ่งจำเป็นต้องหาอัตราส่วนที่ดีและเหมาะสมที่สุดในการเติมเข้าไป แล้วทำให้คอนกรีตสามารถรับกำลังได้เพิ่มมากขึ้น จึงจำเป็นต้องกำหนดตัวแปรน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ให้คงที่เพื่อหาปริมาณโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เหมาะสม

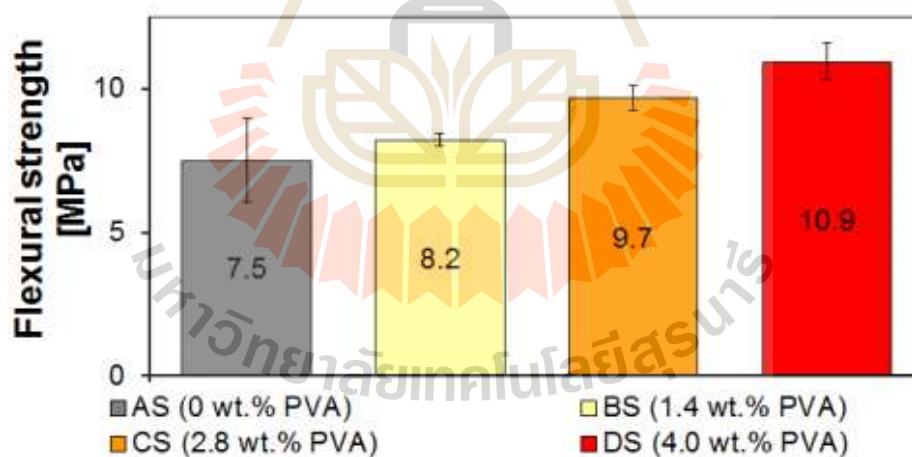
Allahverdi (2009) ศึกษากำลังรับแรงดัดของซีเมนต์เพสต์ปอร์ตแลนด์เมื่อเติมโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ และสมบัติบางประการของซีเมนต์เพสต์ปอร์ตแลนด์



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดซีเมนต์เพสต์ปอร์ตแลนด์ต่อปริมาณของพอลิเมอร์ของอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดซีเมนต์เพสต์ปอร์ตแลนด์ต่อปริมาณของพอลิเมอร์ของอัตราส่วนที่แตกต่างกัน รูปที่ 2.2 ที่อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ 0.28 พบว่าเมื่อเติมโพลิไวนิลแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ กำลังรับแรงดัดมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากปริมาณน้ำในอัตราส่วนน้อยเกิน หรือปริมาณน้ำมีอัตราส่วนไม่เหมาะสม จึงส่งผลไปถึงกำลังรับแรงดัด ที่อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ 0.32 พบว่าเมื่อเติมโพลิไวนิลแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ กำลังรับแรงดัดจะเพิ่มขึ้นตามเรื่อย ๆ ไปถึงจุดที่ 0.016 คือจุดที่ดีที่สุดในการเติมพอลิเมอร์เข้าไป แล้วทำให้ซีเมนต์เพสต์ปอร์ตแลนด์ มีกำลังรับแรงดัดมากที่สุด ที่อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ 0.30 ก็เช่นเดียวกันกับอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ 0.32 ดังนั้นแล้วจากกราฟดังกล่าว พบว่าอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ ที่เหมาะสมที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์ปอร์ตแลนด์ มีกำลังรับแรงดัดที่มากที่สุด คือ อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ ที่ 0.30

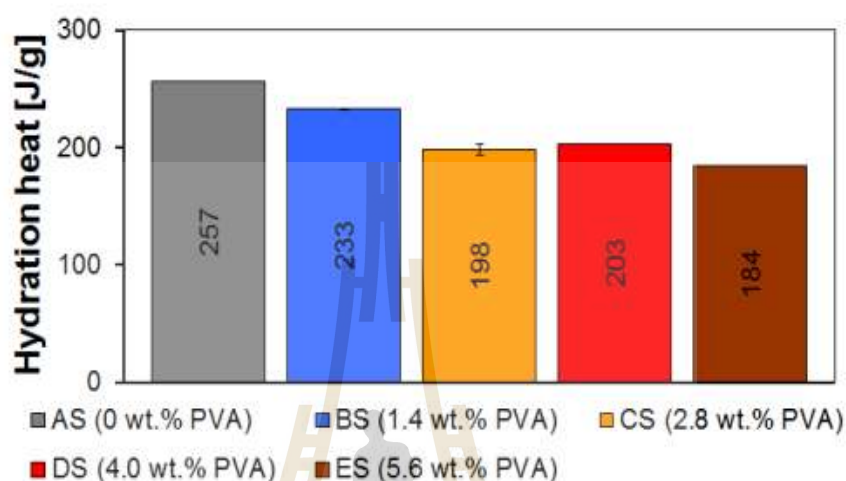
JAROSLAV (2015) ศึกษาคุณสมบัติของโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่ใช้ในการปรับปรุงซีเมนต์เพสต์ในงานคอนกรีต วัสดุพอลิเมอร์ได้ถูกนำมาใช้ปรับปรุงสำหรับงานคอนกรีตงานอาคารต่างๆ เนื่องจากวัสดุพอลิเมอร์มีสมบัติบางประการที่ดี เมื่อผสมเข้าไปกับคอนกรีตส่งผลทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงดัดที่เพิ่มมากขึ้น มีความยืดหยุ่นสูง



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตต่ออัตราส่วนของโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ 0.35

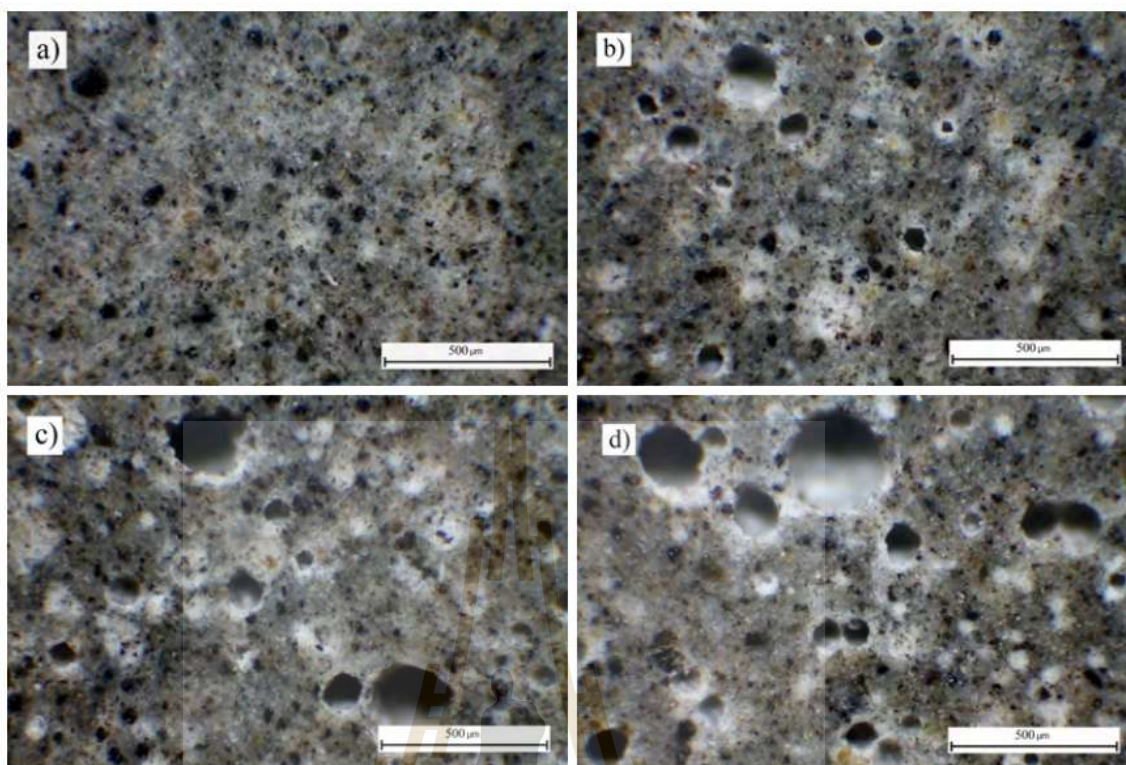
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตต่ออัตราส่วนของโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ 0.35 รูปที่ 2.3 เมื่อเติมโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อัตราส่วนที่ร้อยละ 0 คอนกรีตรับกำลังแรงดัดได้ 7.5 MPa เมื่อเติมโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อัตราส่วนที่ร้อยละ 1.4 คอนกรีตรับกำลังแรงดัดได้ 8.2 MPa เมื่อเติมโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่

อัตราส่วนที่ร้อยละ 2.8 คอนกรีตรับกำลังแรงอัดได้ 9.7 MPa เมื่อเติมโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อัตราส่วนที่ร้อยละ 4.0 คอนกรีตรับกำลังแรงอัดได้ 10.9 MPa ดังนั้นจากกราฟจึงสรุปได้ว่าเมื่อมีการเติมโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มตามไปด้วย



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาเครชันต่ออัตราส่วนของโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ 0.35

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาเครชันต่ออัตราส่วนของโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ 0.35 รูปที่ 2.4 เมื่อมีการเติมโพลิไวนิลแอลกอฮอล์เพิ่มมากขึ้นในอัตราส่วนที่ไม่เหมาะสม ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่กระทำกับน้ำก็จะลดลง ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงได้

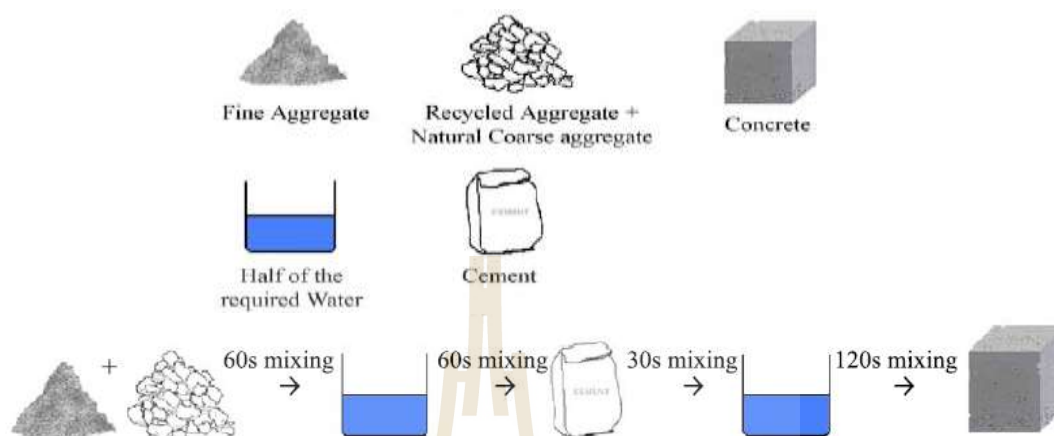


รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์เมื่อเติมโพลีไวนิลโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ที่อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ 0.35 โดยที่รูป (a) เติม PVA ที่ร้อยละ 0 (b) เติม PVA ที่ร้อยละ 1.4 (c) เติม PVA ที่ร้อยละ 2.8 (d) เติม PVA ที่ร้อยละ 4.0

จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์เมื่อเติมโพลีไวนิลโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ที่อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ 0.35 โดยที่รูป (a) เติม PVA ที่ร้อยละ 0 (b) เติม PVA ที่ร้อยละ 1.4 (c) เติม PVA ที่ร้อยละ 2.8 (d) เติม PVA ที่ร้อยละ 4.0 รูปที่ 2.5 พบว่าเมื่อเติมโพลีไวนิลแอลกอฮอล์มากขึ้น จะทำให้เกิดช่องว่างในคอนกรีตมากขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์นั้นเพิ่มความหนืดของน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ส่งผลให้เกิดฟองอากาศในคอนกรีตขณะผสม ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดต่ำลงได้

Tam (2004) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการใหม่ในการผสมคอนกรีตคือ ขั้นตอนวิธีการผสมแบบ Two Stage Mixing Approach (TSMA) ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 2.6 เพื่อปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นคอนกรีตไร้ไขมันเนื่องด้วยเหตุที่ธรรมชาติของคอนกรีตไร้ไขมันนั้นมีรูพรุนและรอยร้าวจากกระบวนการไร้ไขมัน กระบวนการผสมแบบ TSMA นั้นจะเข้าไปช่วยปิดรูพรุนและรอยแตกบางส่วนส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่ดีขึ้นและทำให้มีความแข็งแรงสูงเมื่อ

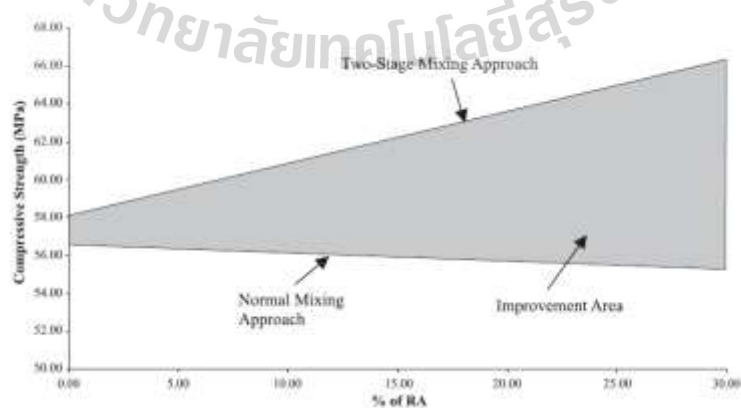
เปรียบเทียบกับวิธีการผสมแบบดั้งเดิมซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.7 ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้การผสมแบบ TSMA และคอนกรีตที่ใช้การผสมแบบปกติ



รูปที่ 2.6 สัญลักษณ์ภายในรูปและขั้นตอนการผสมคอนกรีตแบบ

Two Stage Mixing Approach (TSMA)

จากภาพสัญลักษณ์ภายในรูปและขั้นตอนการผสมคอนกรีตแบบ Two Stage Mixing Approach (TSMA) รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการผสมแบบ Two Stage Mixing Approach (TSMA) ที่นำมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดผสมให้เข้ากันในระยะเวลา 60 วินาที จากนั้นเติมน้ำ 1:2 ของน้ำที่ใช้ในการผสม ผสมให้เข้ากันในระยะเวลา 60 วินาที จากนั้นเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมในระยะเวลา 30 วินาที เติมน้ำที่เหลือลงไปในกาผสมและผสมต่ออีก 120 วินาที จึงจบขั้นตอนการผสมแบบ Two Stage Mixing Approach (TSMA)



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้การผสมแบบดั้งเดิมและคอนกรีตที่ใช้การผสมแบบ Two Stage Mixing Approach

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้การผสมแบบดั้งเดิมและคอนกรีตที่ใช้การผสมแบบ Two Stage Mixing Approach รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้การผสมแบบดั้งเดิมนั้นมีกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้การผสมแบบ Two Stage Mixing Approach (TSMA) นั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า วิธีการผสมแบบใหม่นี้สามารถปรับปรุงกำลังอัดของ คอนกรีต RCA ได้



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ คอนกรีตรีไซเคิล และโพลิไวนิลแอลกอฮอล์

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15
2. ทราย ใช้ทรายน้ำจืด
3. น้ำ ใช้น้ำประปา
4. คอนกรีตรีไซเคิล ใช้แทนหินแกรนิต ร้อยละ 100 ที่ได้จากการบดคอนกรีตที่ไม่ได้ใช้งานแล้ว เป็นตัวแทนของมวลรวมหยาบที่ได้จากการรื้อถอน โครงสร้างคอนกรีต
5. เถ้าลอย (Fly Ash)
6. โพลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นสารประกอบตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตกาวลาเท็กซ์

3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับรายละเอียดวิธีการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาคูสมบัติของคอนกรีตรีไซเคิลที่นำมาใช้แทนหินแกรนิต เถ้าลอยผสมกับซีเมนต์และการเติมวัสดุพอลิเมอร์ (โพลิไวนิลแอลกอฮอล์) เข้าไป เพื่อเป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีต

3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

- การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต ใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีตซึ่งเตรียมขึ้น โดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 10x10x50 ซม³



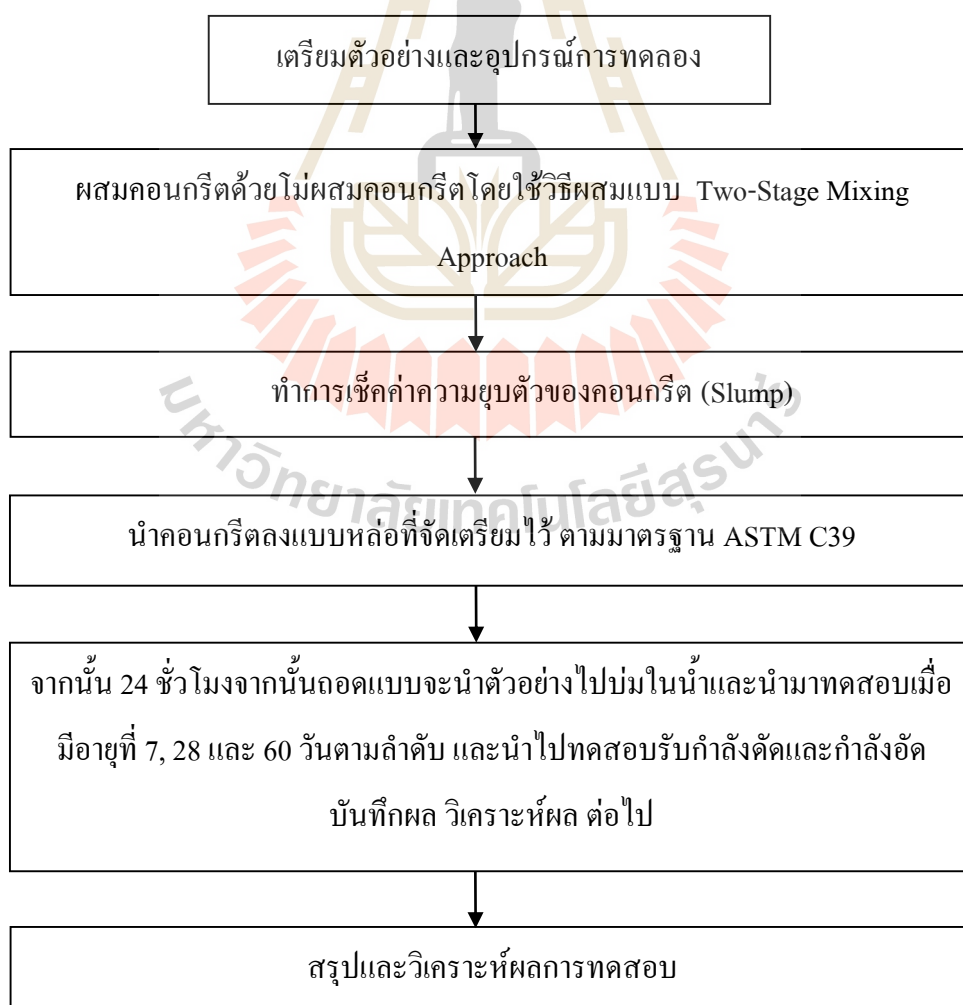
รูปที่ 3.1 แบบหล่อที่ใช้การทดลอง

- ปริมาณโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เท่ากับ ร้อยละ 0 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์และค่าอัตราส่วนของน้ำตอปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5
- ปริมาณการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ (FA/c) เท่ากับ 10/90 20/80 และ 30/70 โดยน้ำหนัก
- คอนกรีตที่ใช่เป็นมวลรวมหยาบนั้น ต้องทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำโดยการแช่น้ำ ที่ 24 ชั่วโมง

3.2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดลอง

3.2.2.1 ขั้นตอนการทดลอง

การหล่อคอนกรีตนี้ จะยึดการหล่อตามมาตรฐาน ASTM C192 เป็นการผสมคอนกรีตด้วยโม้ผสมคอนกรีตโดยจะผสมด้วยวิธี two-stage mixing approach (TSMA) method ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการปรับปรุงคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบโดย มีขั้นตอนในการดำเนินการทดลองดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการผสมคอนกรีตโดยวิธี two-stage mixing approach (TSMA)

จากแผนผังขั้นตอนการผสมคอนกรีตโดยวิธี two-stage mixing approach (TSMA) method รูปที่ 3.2 แสดงถึงขั้นตอนการนำมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดผสมให้เข้ากันในระยะเวลา 60 วินาที จากนั้นเติมน้ำ 1:2 ของน้ำที่ใช้ในการผสม ผสมให้เข้ากันในระยะเวลา 60 วินาที จากนั้นเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมในระยะเวลา 30 วินาที เติมน้ำที่เหลือลงไปในกาผสมและผสมต่ออีก 120 วินาที จึงจบขั้นตอนการผสมแบบ Two Stage Mixing Approach (TSMA)

3.2.2.2 อัตราส่วนต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมและระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต

Description			Curing Temperature	Compressive Strength and Flexural Strength.
W/ Binder ratios	PVA (%)	Replacement of FA : Cement (FA/c)	Curing in water	7, 28, 60 days
0.5	0	0 : 100		
	0.5	10 : 90		
	1.0	20 : 80		
	1.5	30 : 70		
	2.0			

จากตารางแสดงอัตราส่วนผสมและระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต รูปที่ 3.3 แสดงอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้คือ 0.5 อัตราส่วนของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ที่ใช้คือร้อยละ 0 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างคอนกรีต คือ 7 28 และ 60 วันแล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปทดสอบหาค่า

ตารางที่ 3.2 อธิบายอัตราส่วนผสมของการผสมคอนกรีตสำหรับใช้ในการหล่อตัวอย่าง โดยใช้ อัตราส่วนอยู่ที่ ปูน 1.2 : ทราย 2.4 : RCA 3.4

Mix	Mix Proportion (kg/m ³)				
	Cement	Fly Ash	PVA weight.	RCA ^a	Sand
PVA0FA0	417.4	0	-	1187	890
PVA0.5FA0	417.4	0	2.087	1185	873

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

Mix	Mix Proportion (kg/m ³)				
	Cement	Fly Ash	PVA weight.	RCA ^a	Sand
PVA1FA0	417.4	0	4.174	1191	874
PVA1.5FA0	417.4	0	6.261	1182	867
PVA2FA0	417.4	0	8.348	1178	864
PVA0FA10	417.4	41.7	-	1185	873
PVA0.5FA10	417.4	41.7	2.087	1192	877
PVA1FA10	417.4	41.7	4.174	1187	870
PVA1.5FA10	417.4	41.7	6.261	1173	860
PVA2FA10	417.4	41.7	8.348	1175	852
PVA0FA20	417.4	83.5	-	1174	860
PVA0.5FA20	417.4	83.5	2.087	1186	871
PVA1FA20	417.4	83.5	4.174	1189	873
PVA1.5FA20	417.4	83.5	6.261	1177	862
PVA2FA20	417.4	83.5	8.348	1184	869
PVA0FA30	417.4	125.22	-	1173	855
PVA0.5FA30	417.4	125.22	2.087	1193	878
PVA1FA30	417.4	125.22	4.174	1187	866
PVA1.5FA30	417.4	125.22	6.261	1169	854
PVA2FA30	417.4	125.22	8.348	1177	859

จากตารางอธิบายอัตราส่วนผสมของการผสมคอนกรีตสำหรับการหล่อตัวอย่าง ตารางที่ 3.2 ตารางข้างต้นได้แสดงถึงปริมาณอัตราส่วนของโพลิไวนิลแอลกอฮอล์และเถ้าลอยที่เติมเข้าไปในการหล่อตัวอย่างคอนกรีต

3.2.3 มาตรฐานการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีต

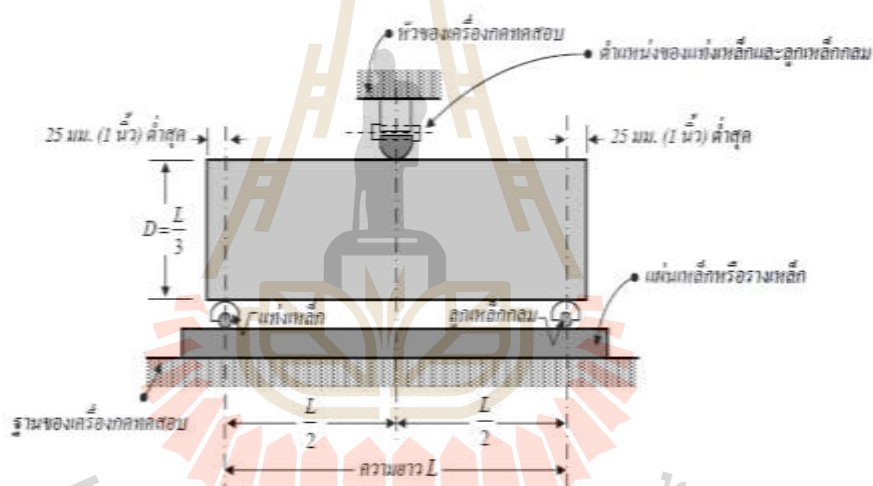
3.2.3.1 มาตรฐานการทดสอบนี้ ครอบคลุมถึงการทดสอบหาลำดับต้านทานแรงดัดของคอนกรีตเพื่อหาค่าโมดูลัส การแตกร้าว (Modulus of Rupture) ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีใช้แรงกดหนึ่งจุดกึ่งกลางคาน (Center Point Loading) และวิธีใช้แรงกดคาน 2 จุด โดยกำหนดตำแหน่งของจุดทั้งสองเป็นตำแหน่งที่แบ่งคานออกเป็น 3 ส่วนเท่าๆ กัน

3.2.3.2 มาตรฐานนี้ใช้หน่วย SI (International system Units) เป็นหลัก และใช้ค่าการแปลงหน่วยของแรง 1 กิโลกรัมแรงเท่ากับ 9.806 นิวตัน

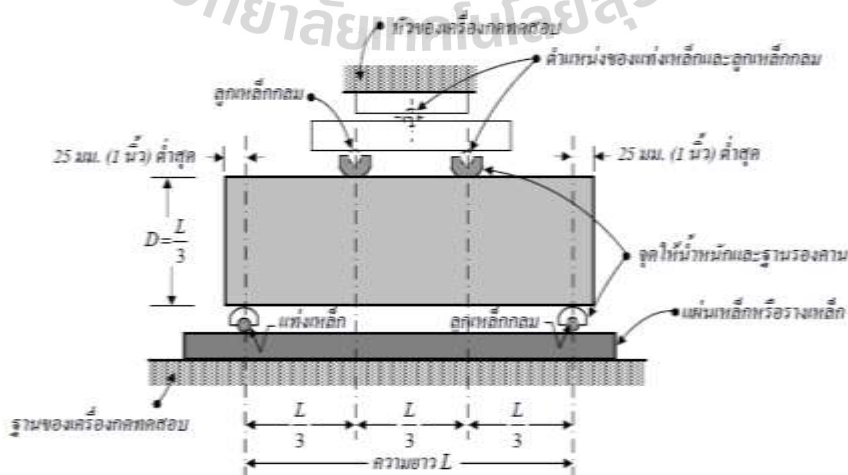
3.2.3.3 ค่าโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture) เป็นค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากแรงคดสูงสุดที่กระทำต่อตัวอย่างคอนกรีต ณ จุดวิบัติ

3.2.4 การทดสอบกำลังต้านทานแรงคดของคอนกรีต

3.2.4.1 วางขึ้นทดสอบลงบนฐานรองรับคาน วางหัวคดให้ตำแหน่งของหัวคดคานและฐานรองรับคานอยู่ตามกำหนด โดยการทดสอบวิธีใช้แรงกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลางคานให้จัดตำแหน่งเครื่องมือตามกำหนดในรูปที่ 3.3 ส่วนการทดสอบวิธีใช้แรงกดคานสองจุดให้จัดตำแหน่งเครื่องมือตามกำหนดในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 การทดสอบวิธีใช้แรงกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลาง

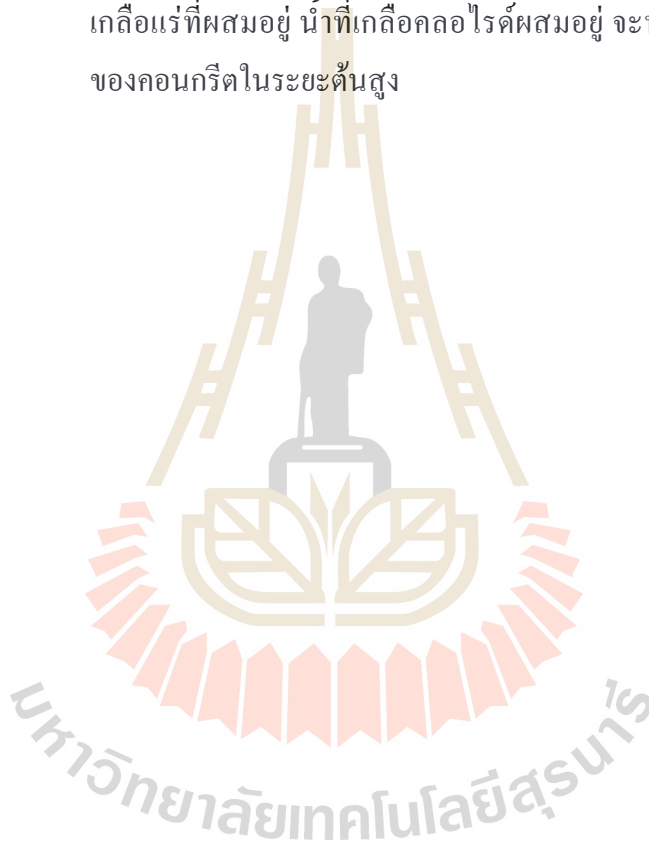


รูปที่ 3.4 การทดสอบวิธีใช้แรงกดสองจุด

- 3.2.4.2 ปรับอัตราการกดเครื่องทดสอบด้วยแรงประมาณร้อยละ 3 ถึงร้อยละ 6 ของแรงประลัย (Ultimate Load) แล้วค่อยตรวจสอบผิวสัมผัสของตัวคกดกับคานและฐานรองคานกับคานความีช่องขนาดกว้างกว่า 0.15 มิลลิเมตร ในช่วง 25 มิลลิเมตรหรือไม่ ถ้ามีให้แต่งคอนกรีตที่บริเวณช่วงนั้น ๆ ด้วยการฝนให้เรียบ ช่องที่ขนาดกว้างน้อยกว่า 0.15 มิลลิเมตร ในช่วง 25 มิลลิเมตร อาจอุดได้โดยการวางแผ่นหนัง (Leather Shim) ไว้ระหว่างผิวสัมผัส แผ่นหนังที่ใช้จะต้องมีขนาดเท่ากับ 6.4 มิลลิเมตร กว้าง 25 มิลลิเมตร ถึง 50 มิลลิเมตร
- 3.2.4.3 เพิ่มแรงกดอย่างต่อเนื่องโดยไม่ให้มีการกระตุก ในช่วงครึ่งแรกของแรงประลัย อาจเพิ่มแรงได้อย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นให้เพิ่มแรงด้วยอัตราที่อยู่ในช่วง 0.9 ถึง 1.2 เมกะปาสกาลต่อวินาที (9 ถึง 12 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที) จนกระทั่งคานตัวอย่างวิบัติ
- 3.2.4.4 วัดด้านกว้างและลึกของคานที่บริเวณที่มีรอยแตกด้านละ 3 ครั้ง โดยให้มีความละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร แล้วหาค่าเฉลี่ยของขนาดหน้าตัดพร้อมทั้งวาดรายละเอียดการแตกร้าวของคานตัวอย่าง
- 3.2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังค้ำของคอนกรีต**
- 3.2.5.1 คุณสมบัติของวัสดุผสมปูนซีเมนต์ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลที่สำคัญมาก ทั้งนี้เพราะว่าปูนซีเมนต์แต่ละประเภท จะก่อให้เกิดกำลังของคอนกรีตที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้แม้ว่าจะเป็นปูนซีเมนต์ประเภทเดียวกัน แต่มีความละเอียดแตกต่างกันแล้ว อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตก็จะแตกต่างกันไปด้วยคือ ถ้าปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากก็จะให้กำลังสูง โดยเฉพาะหลังจากที่แข็งตัวไปแล้วไม่นาน
- 3.2.5.2 มวลรวมมีผลต่อกำลังของคอนกรีตเพียงเล็กน้อย เพราะมวลรวมที่ใช้กันอยู่ทั่วไป มักมีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์ อย่างไรก็ตามมวลรวมหยาบที่เป็นหินย่อย ซึ่งมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมหรือผิวหยาบจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตดีกว่าพวกกรวดที่มีผิวเกลี้ยง ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมก็มีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน เพราะคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่ จะต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่ามวลรวมขนาดเล็ก สำหรับคอนกรีตที่มีความสามารถเท่ากันได้ ดังนั้นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่ จึงมักให้กำลังดีกว่า ส่วนขนาดละเอียดของมวลรวมจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตในแง่

ที่ว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีส่วนขนาดละเอียดไม่เหมาะสม คือมีส่วนละเอียดมากเกินไปนั้น จะต้องการปริมาณน้ำมากกว่ามวลรวมที่มีส่วนละเอียดที่ดี เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้เท่ากัน อีกทั้งยังก่อให้เกิดฟองอากาศแทรกตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตเป็นจำนวนมากกว่าส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลงได้ นอกจากนี้ความสะอาดของมวลรวมก็จะมีผลต่อกำลังของคอนกรีต เช่นกัน

3.2.5.3 น้ำมีผลต่อกำลังของคอนกรีตตามความใส และปริมาณของสารเคมีหรือเกลือแร่ที่ผสมอยู่ น้ำที่เกลือคลอไรด์ผสมอยู่ จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตในระยะต้นสูง



บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาคูณสมบัติด้านกำลังดัดของคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบ (Recycle Concrete Aggregate) ปรับปรุงด้วยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol) และเถ้าลอย (Fly Ash) ในครั้งนี้ ได้พิจารณาผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลในหัวข้อดังต่อไปนี้ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา คุณสมบัติด้านซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาซึ่งได้แก่ ปริมาณโพลีไวนิลแอลกอฮอล์และปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสม ค่าความเครียดดัดและกำลังดัด ประสิทธิภาพของตัวอย่างคอนกรีต

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีครั้งนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ (FA/c) เท่ากับ 10/90 20/80 และ 30/70 โดยน้ำหนัก และปริมาณโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เท่ากับ ร้อยละ 0 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 ของ น้ำหนักปูนซีเมนต์และค่าอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5

4.1.1 ความถ่วงจำเพาะ

ตารางที่ 4.1 ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ มีค่าดังตารางที่ 4.1

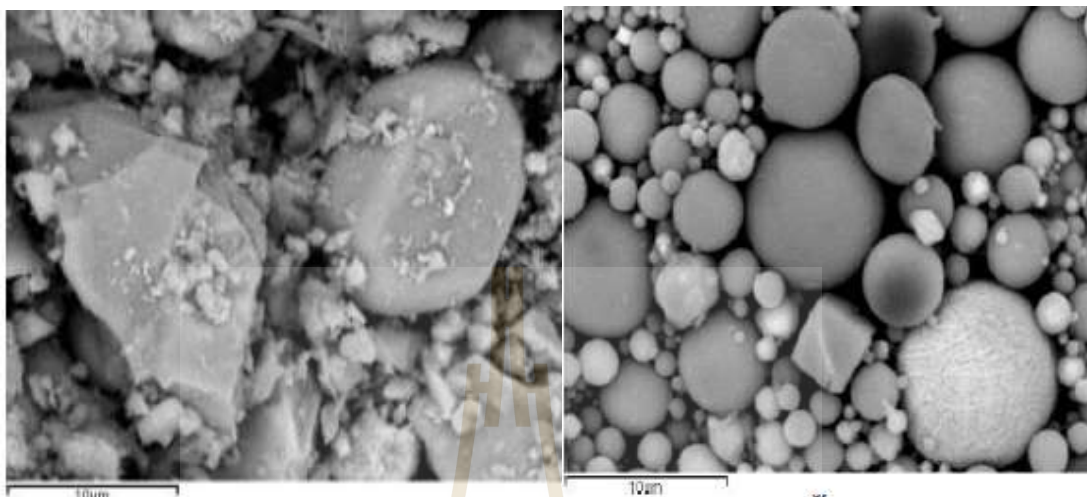
ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

รายการ	ปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย (Fly ash)	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol)
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.39	1.27-1.31

4.1.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา โดยวิธี SEM (Scanning Electronic Microscope) ซึ่งขยาย 3,500 เท่า พบว่าลักษณะของอนุภาคซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (รูปที่ 4.1 (ก)) มีลักษณะเป็นเหลี่ยมคม ผิวขรุขระ ขนาดไม่แน่นอน

แตกต่างกันไปกระจายตัวอยู่ทั่ว ส่วนอนุภาคของเถ้าลอย (รูปที่ 4.1 (ข)) พบว่ามีลักษณะที่แตกต่างจากอนุภาคของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยจะมีลักษณะที่กลมและมีผิวเรียบ



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 3,500 เท่าของ (ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (YONGYUT, 2011) (ข) เถ้าลอย (Fly ash) (YONGYUT, 2011)

4.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 4.2 แสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาคือ

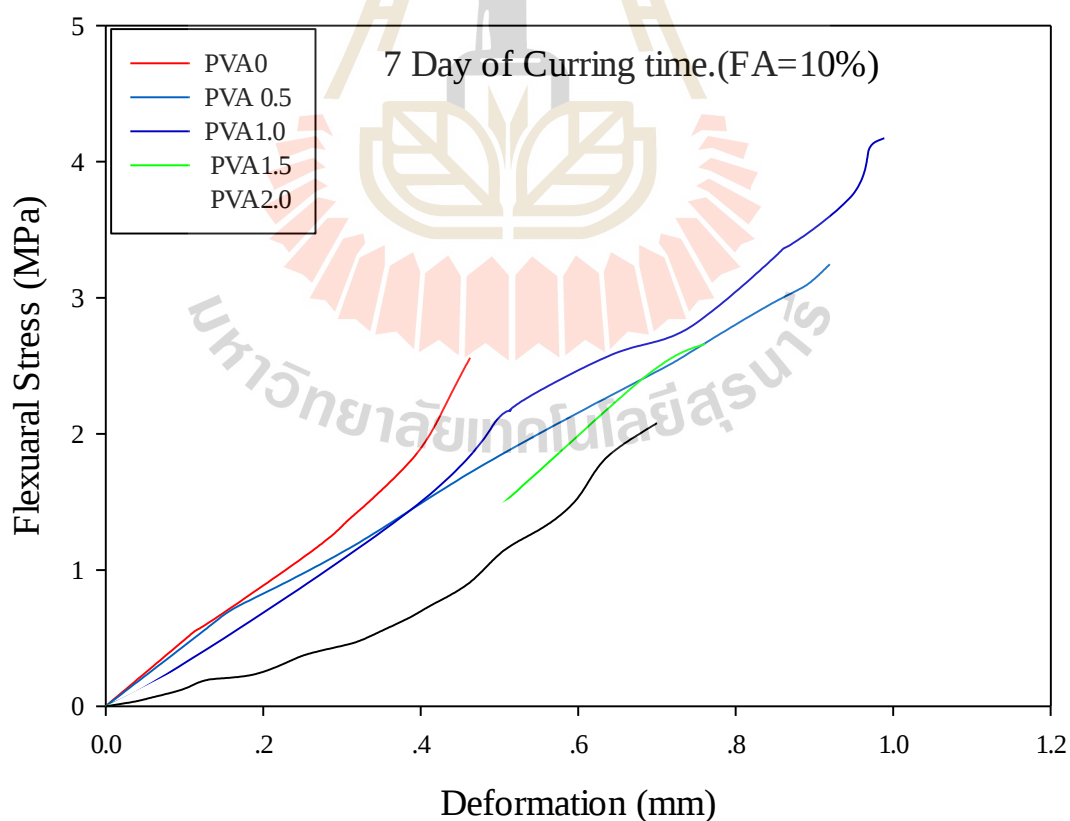
- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าปริมาณของ SiO_2 มีค่าเท่ากับร้อยละ 20.9 SO_3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.7 Fe_2O_3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 3.32 Al_2O_3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 4.7 CaO มีค่าเท่ากับร้อยละ 65.4 MgO มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.54 และ LOI มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.9
- 2) เถ้าลอย พบว่ามีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มีค่าเท่ากับร้อยละ 77.27 SO_3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 4.29 CaO มีค่าเท่ากับร้อยละ 11.3 MgO มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.69 Na_2O มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.81 K_2O มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.03 และ LOI มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.61

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย

วัสดุ	ร้อยละ								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	20.9	2.7	3.32	4.7	65.4	2.54	NA	NA	0.9
เถ้าลอย	39.1 8	22.64	15.45	4.2 9	11.3	1.69	1.81	2.03	1.61

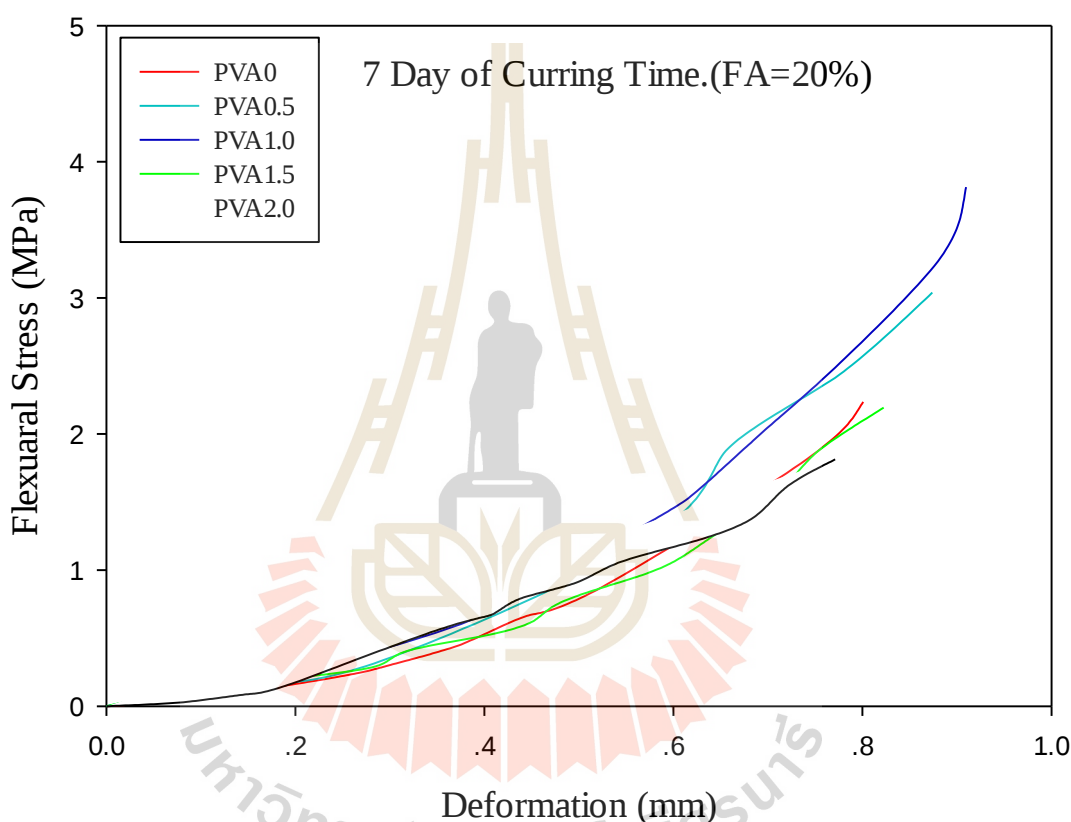
4.2 กำลังัดของคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตไร้เซลเป็นมวลรวมหยาบ (RCA) ปรับปรุงด้วยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และเถ้าลอย (FA)

4.2.1 ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างคอนกรีตที่ 7 วันและส่วนผสมของเถ้าลอยในอัตรา ร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงคดต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน และอัตราส่วน FA/c = 10/90 ที่อายุบ่ม 7 วัน

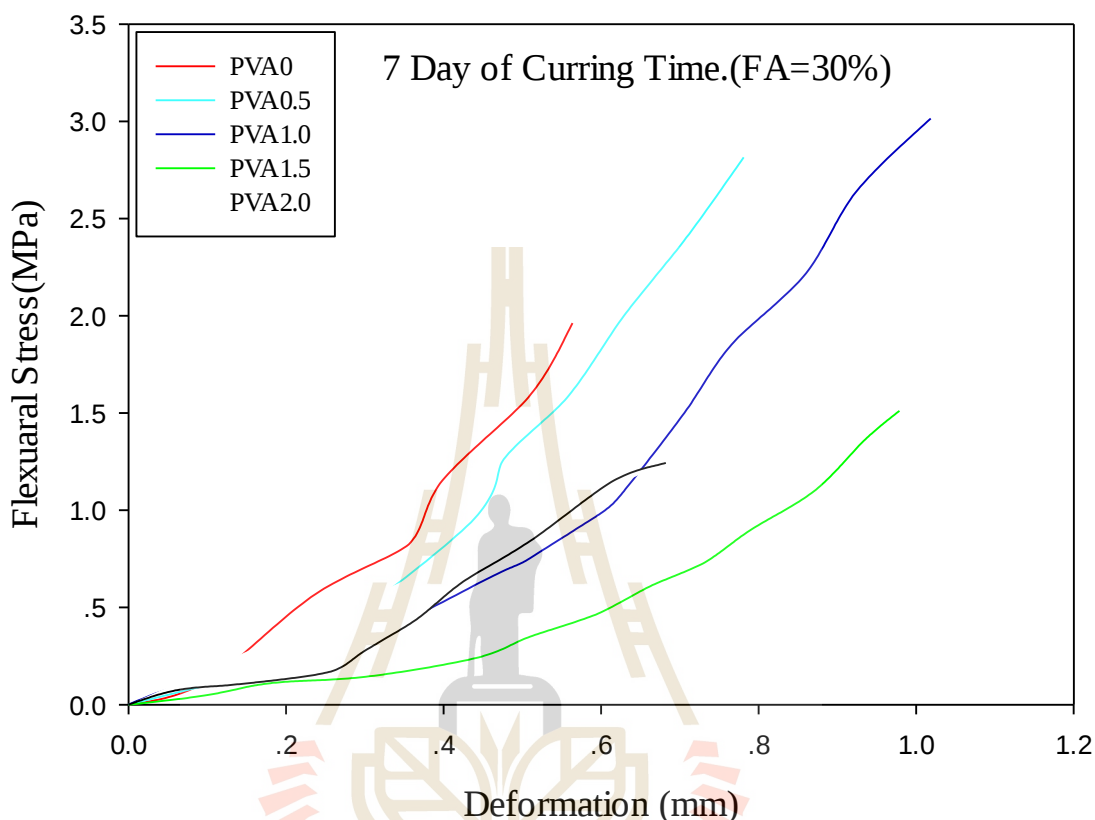
รูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 0 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 2.56 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.463 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 0.5 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 3.25 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.920 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 4.17 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.988 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.5 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 2.66 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.761 mm. และที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 2.08 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.699 mm.



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดัดต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน และอัตราส่วน FA/c = 20/80 ที่อายุบ่ม 7 วัน

รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 0 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 2.24 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.800 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 0.5 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 3.04 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.874 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 3.81 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.909 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.5 มีค่าหน่วยแรงดัด

สูงสุดเท่ากับ 2.19 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.822 mm. และที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 1.81 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.771 mm.



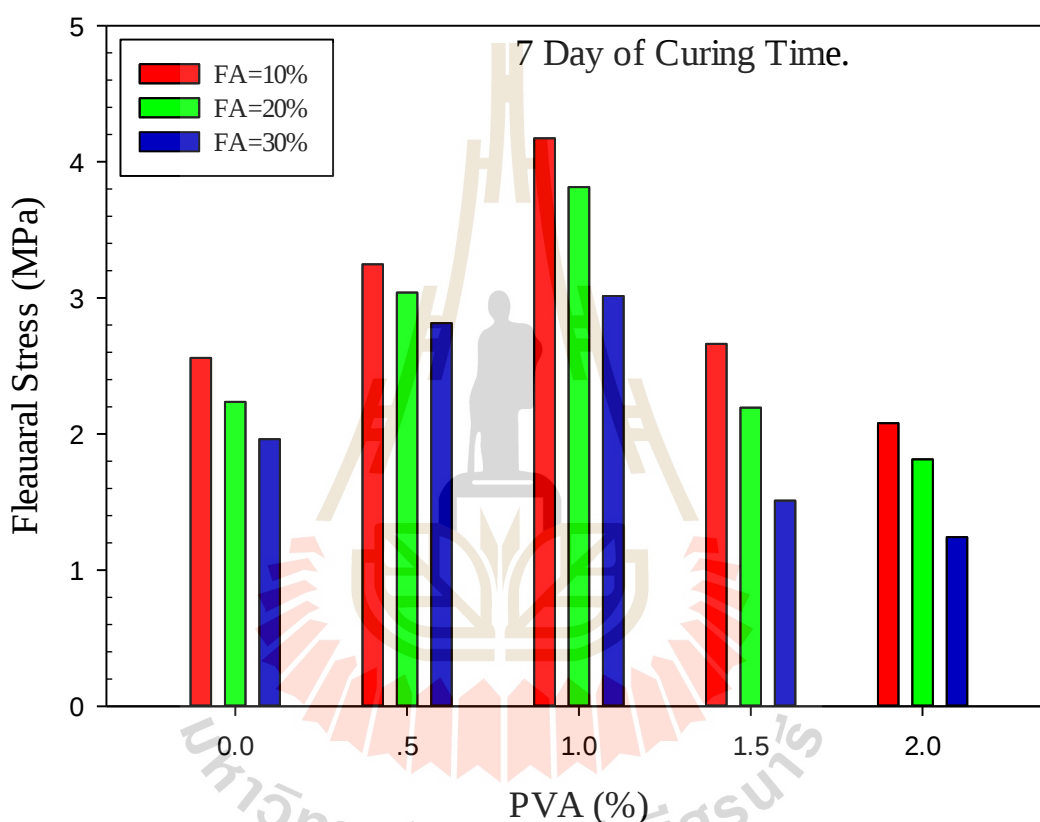
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงคดต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน และอัตราส่วน FA/c = 30/70 ที่อายุบ่ม 7 วัน

รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 0 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 1.96 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.563 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 0.5 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 2.82 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.781 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 3.01 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 1.018 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.5 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 1.51 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.978 mm. และที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 1.24 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.682 mm.

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงคดต่อความเครียดคด ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 20/80 และ 30/70 ที่อายุบ่ม 7 วัน แสดงดังรูปที่ 4.2 ถึง 4.4 ตามลำดับ พบว่า เมื่อเติม PVA จาก ร้อยละ 0 เป็น 0.5 และ 1.0 กำลังคดของคอนกรีตและค่าการ

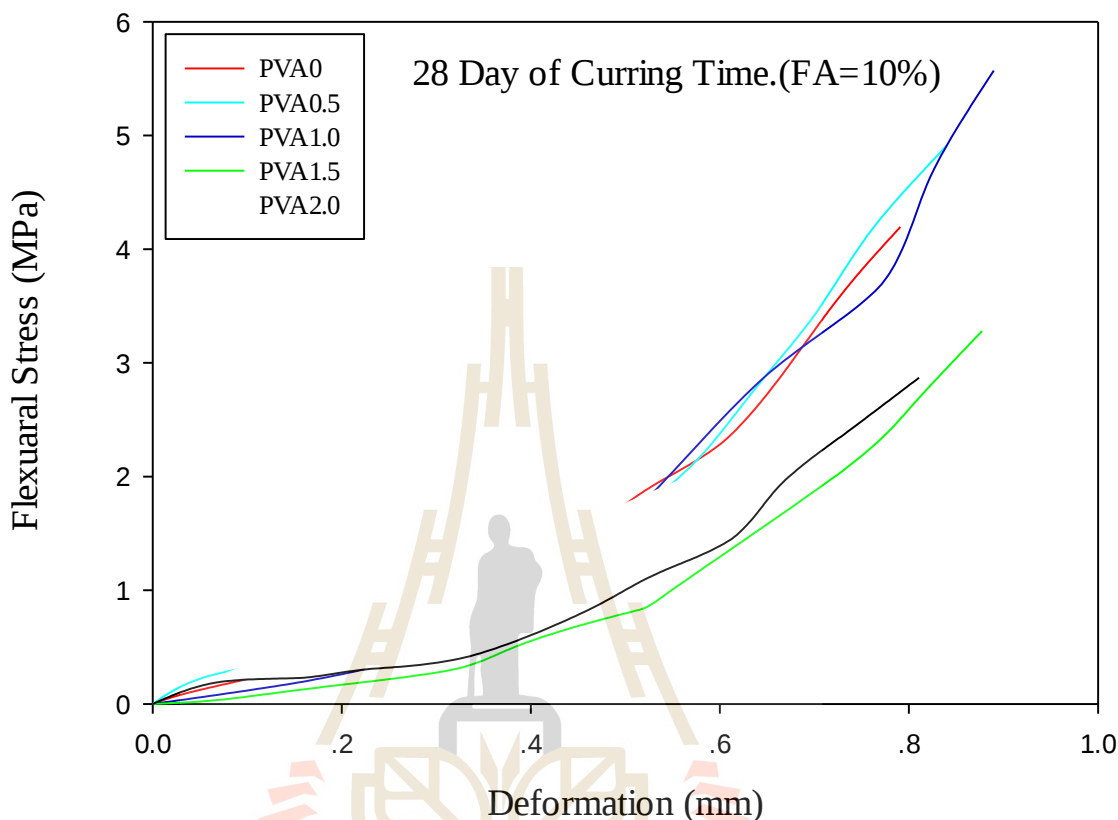
แอ่นตัวมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติม PVA เท่ากับ ร้อยละ 1.5 และ 2.0 กำลังคัดของคอนกรีตและค่าการแอ่นตัวมีค่าลดลง ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคัด (Flexural Strength) และปริมาณ PVA แสดงดังรูปที่ 4.5 จะเห็นว่า ที่ปริมาณ PVA เท่ากัน เมื่ออัตราส่วน FA/c เพิ่มขึ้นกำลังคัดมีค่าลดลง และที่ปริมาณ PVA เท่ากับ 1.0 กำลังคัดมีค่าสูงที่สุดในทุกอัตราส่วน FA/c โดยที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 ให้กำลังคัดสูงสุดเท่ากับ 4.173 MPa



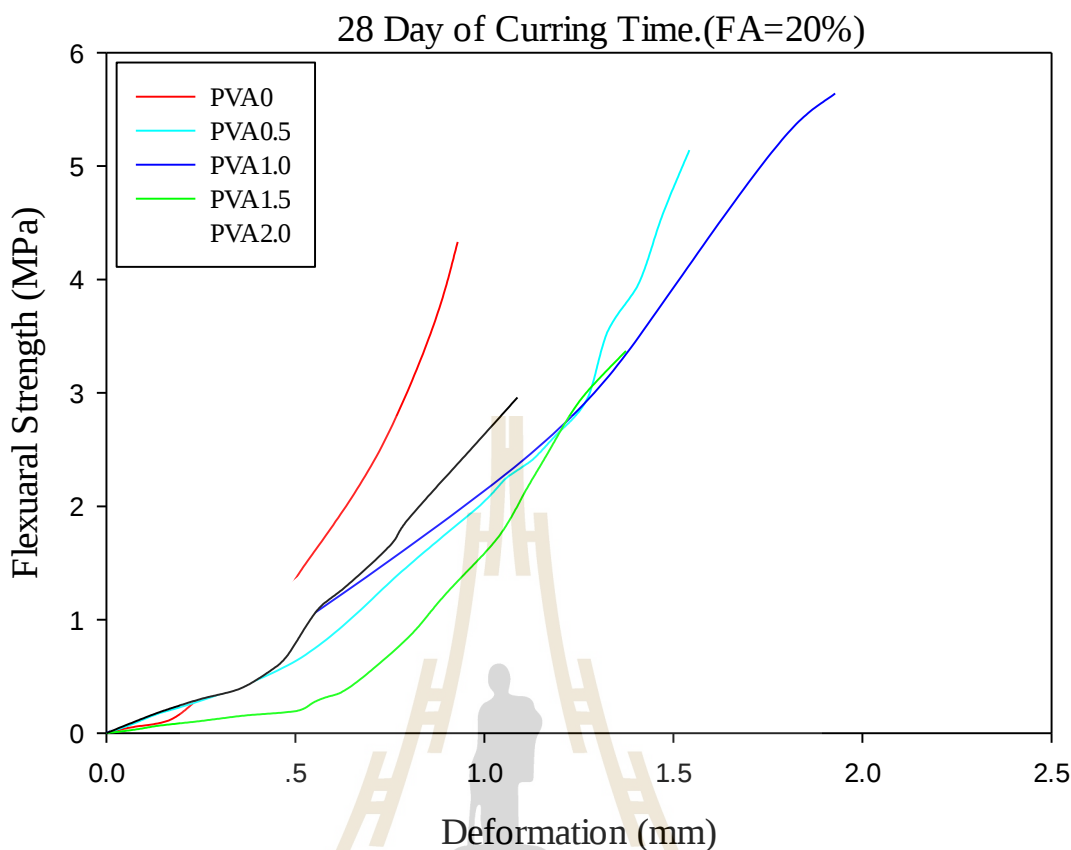
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคัดต่อปริมาณ PVA ที่อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 20/80 และ 30/70 ที่อายุบ่ม 7 วัน

4.2.2 ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างคอนกรีตที่ 28 วันและส่วนผสมของเถ้าลอยในอัตรา ร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ



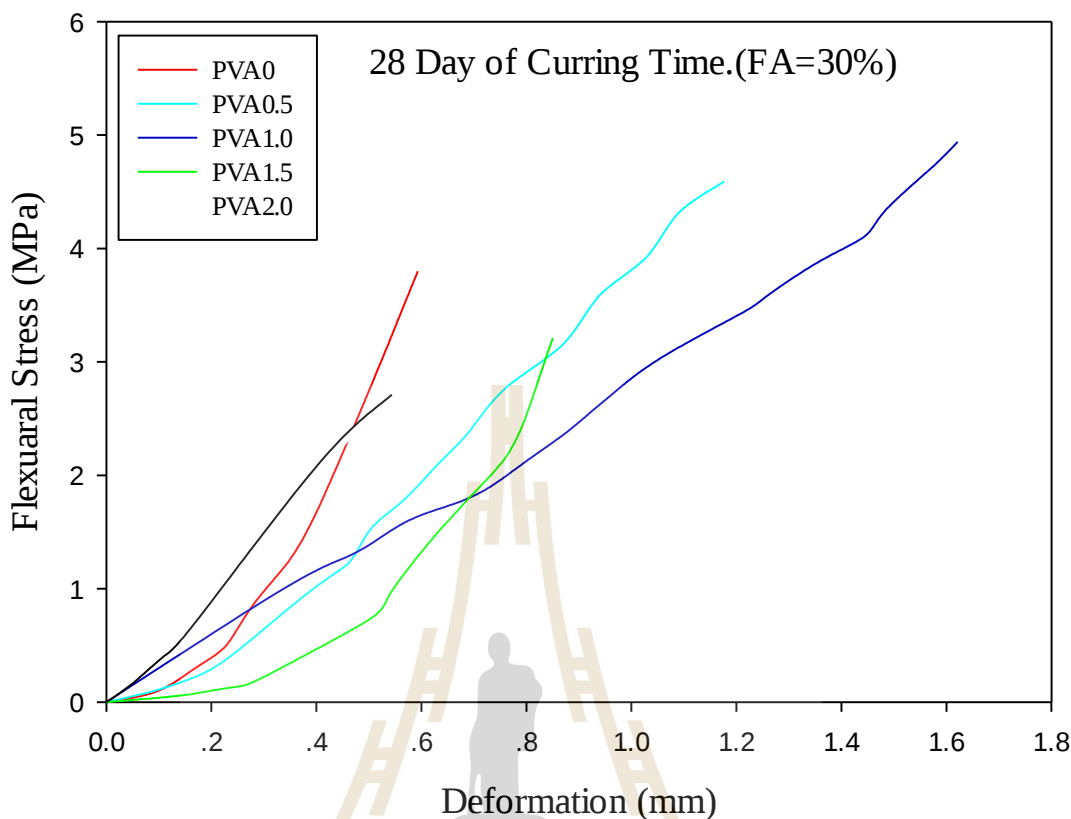
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดัดต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน และอัตราส่วน FA/c = 10/90 ที่อายุบ่ม 28 วัน

รูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 0 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 4.20 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.790 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 0.5 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 4.92 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.840 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 5.57 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.889 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.5 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 3.28 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.877 mm. และที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 2.87 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.810 mm.



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงคดต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน และอัตราส่วน FA/c = 20/80 ที่อายุบ่ม 7 วัน

รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 0 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 4.33 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.929 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 0.5 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 5.14 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 1.542 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 5.64 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 1.927 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.5 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 3.37MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 1.374 mm. และที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 2.96 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 1.087 mm.

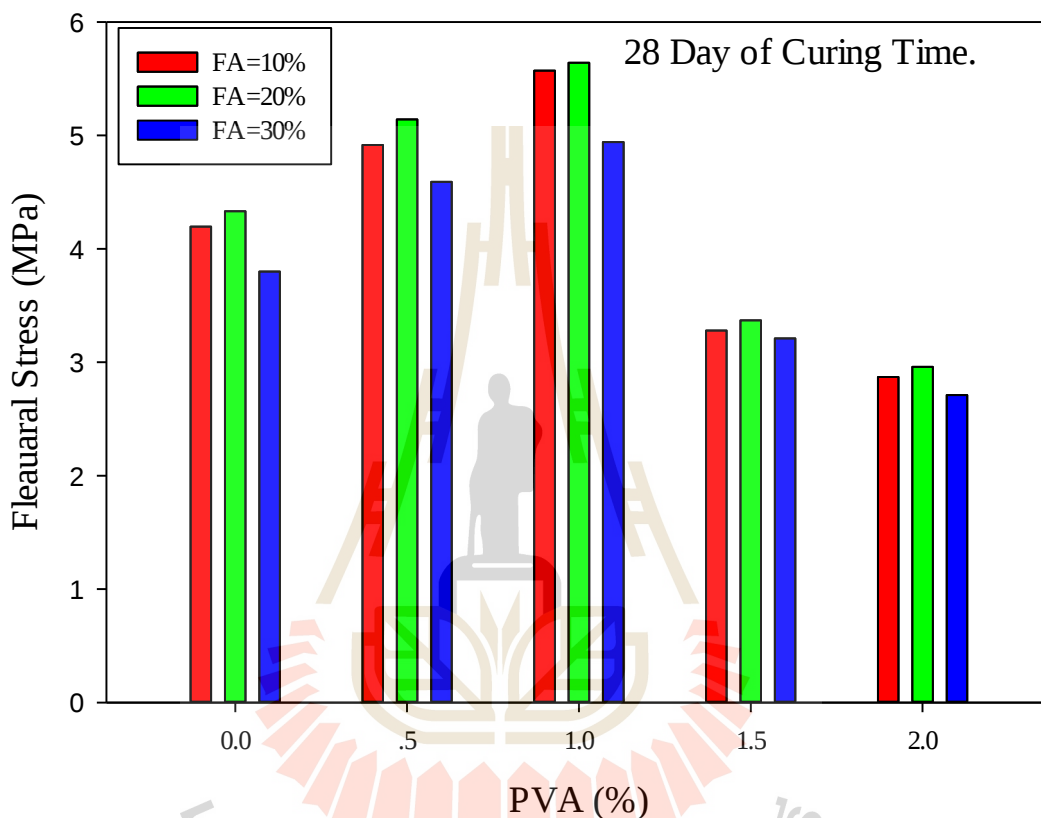


รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดัดต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน และอัตราส่วน FA/c = 30/70 ที่อายุบ่ม 28 วัน

รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 0 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 3.78 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.593 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 0.5 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 4.59 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 1.176 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 4.94 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 1.621 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.5 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 3.21 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.850 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 2.71 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.543 mm.

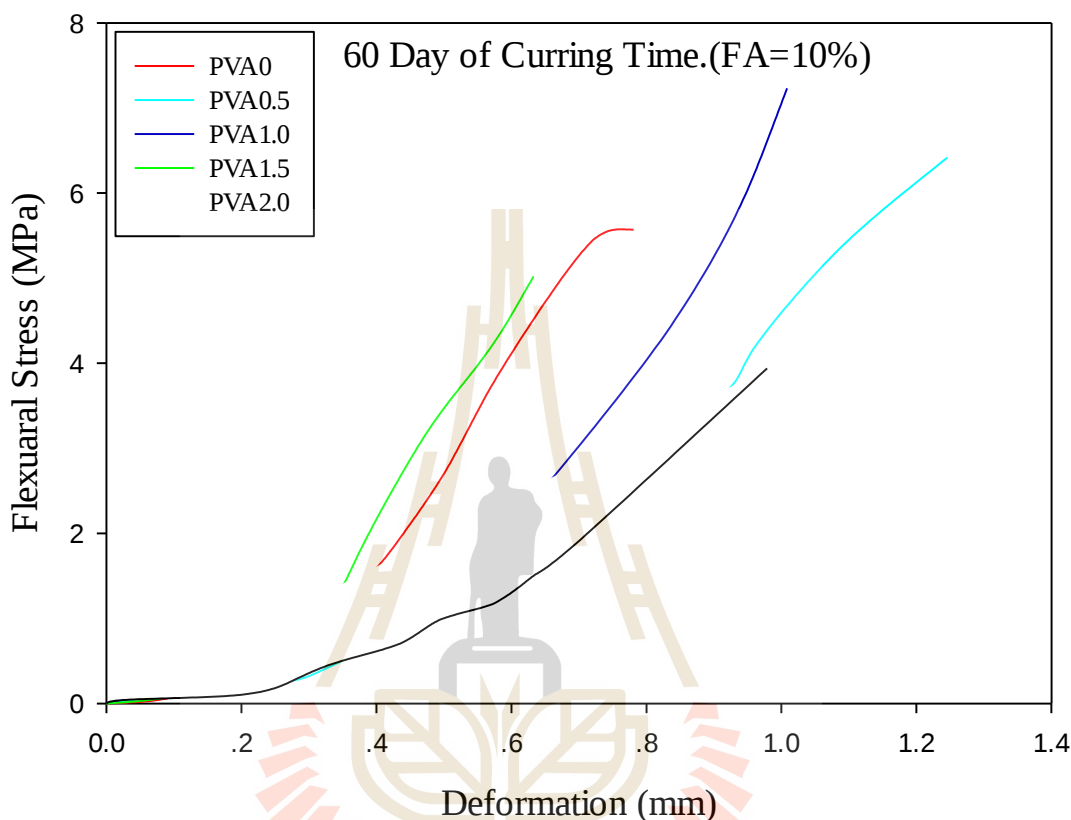
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดัดต่อความเครียดดัด ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 20/80 และ 30/70 ที่อายุบ่ม 28 วัน แสดงดังรูปที่ 4.6 ถึง 4.8 ตามลำดับ พบว่า เมื่อเติม PVA จาก ร้อยละ 0 เป็น 0.5 และ 1.0 กำลังดัดของคอนกรีตและค่าการแอ่นตัวมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติม PVA เท่ากับ ร้อยละ 1.5 และ 2.0 กำลังดัดของคอนกรีตและค่าการแอ่นตัวมีค่าลดลง ตามลำดับ เช่นเดียวกับผลทดสอบที่อายุบ่ม 7 วัน

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัด (Flexural Strength) และปริมาณ PVA แสดงดังรูปที่ 4.9 จะเห็นว่า ที่ปริมาณ PVA เท่ากัน กำลังดัดมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 20/80 และค่ากำลังดัดที่อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70 มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งแตกต่างจากผลทดสอบที่อายุบ่ม 7 วัน โดยที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 20/80 ให้ค่ากำลังดัดสูงสุดเท่ากับ 5.64 MPa



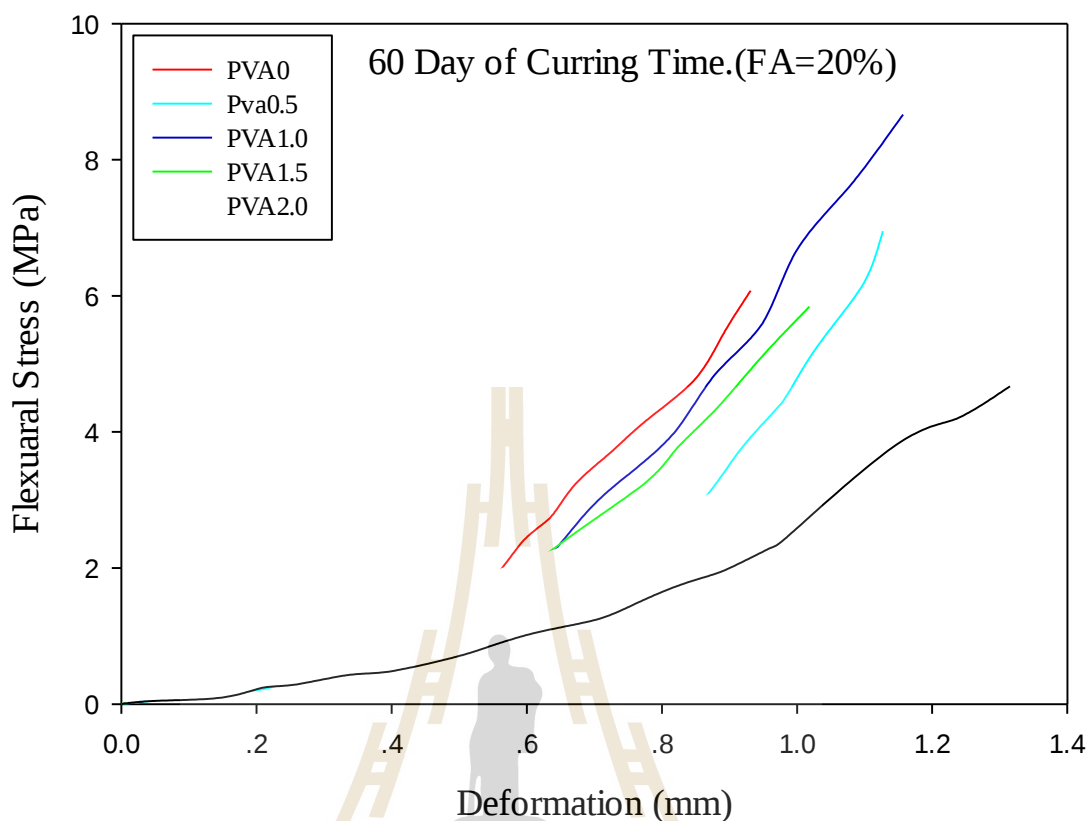
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดต่อปริมาณ PVA ที่อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 20/80 และ 30/70 ที่อายุบ่ม 28 วัน

4.2.3 ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างคอนกรีตที่ 60 วันและส่วนผสมของเถ้าลอยในอัตรา ร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ



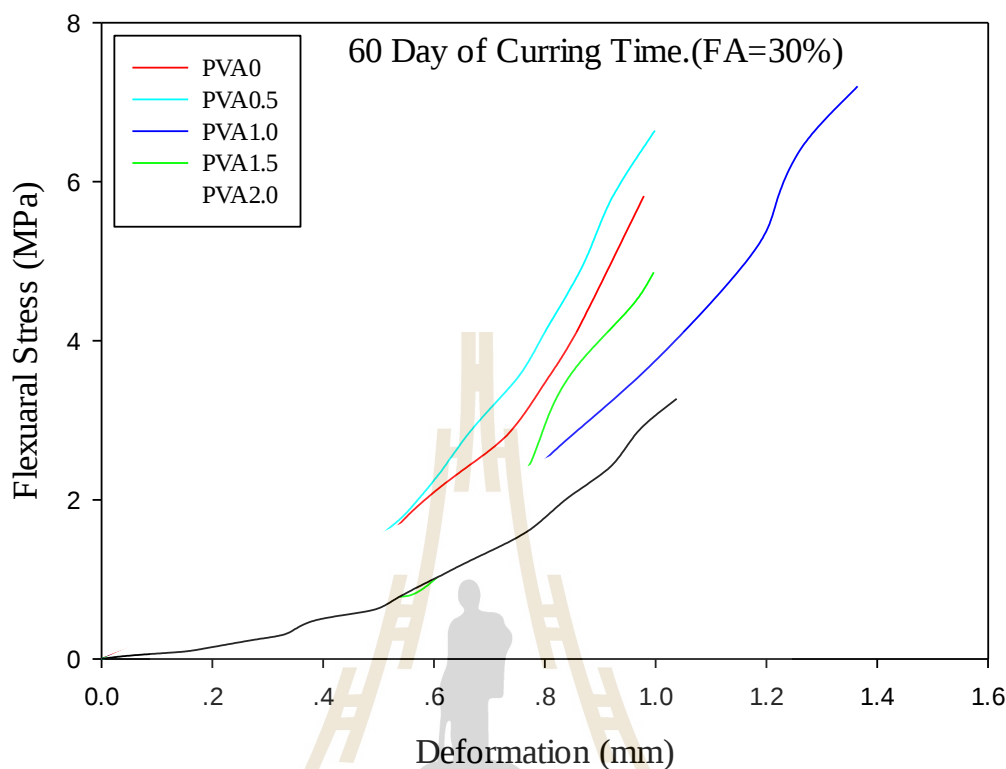
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดัดต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน และอัตราส่วน FA/c = 10/90 ที่อายุบ่ม 60 วัน

รูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 0 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 5.57 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.781 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 0.5 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 6.42 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 1.245 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 7.23 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 1.008 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.5 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 5.02 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.632 mm. และที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 มีค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 3.94 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.978 mm.



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงคดต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน และอัตราส่วน FA/c = 20/80 ที่อายุบ่ม 60 วัน

รูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 0 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 6.08 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.931 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 0.5 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 6.95 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 1.127 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 8.66 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 1.156 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.5 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 5.84 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 1.018 mm. และที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 4.67 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 1.314 mm.

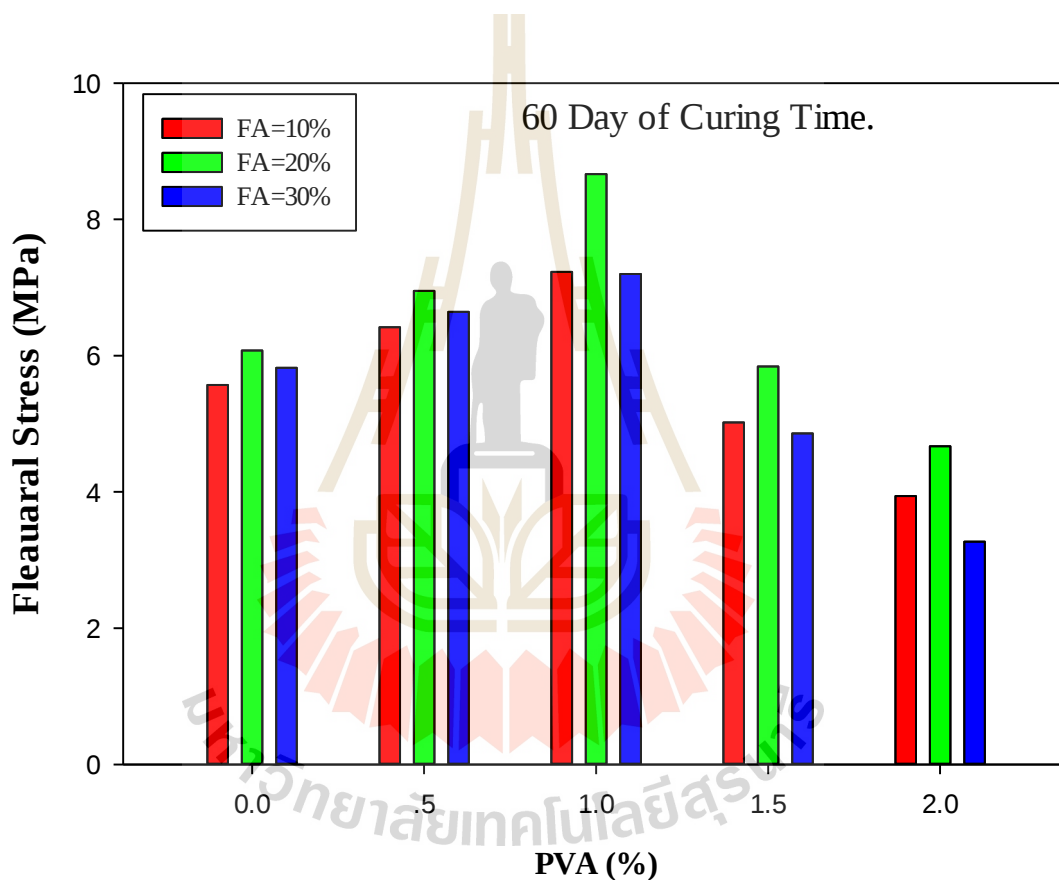


รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงคดต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน และอัตราส่วน FA/c = 30/70 ที่อายุบ่ม 60 วัน

รูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 0 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 5.82 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.978 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 0.5 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 6.64 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.998 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 7.20 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 1.364 mm. ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.5 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 4.86 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 0.996 mm. และที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 มีค่าหน่วยแรงคดสูงสุดเท่ากับ 3.27 MPa ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 1.038 mm.

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงคดต่อค่าการแอ่นตัว ซึ่งมีปริมาณ PVA แตกต่างกัน อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 20/80 และ 30/70 ที่อายุบ่ม 60 วัน แสดงดังรูปที่ 4.10 ถึง 4.12 ตามลำดับ พบว่า เมื่อเติม PVA จาก ร้อยละ 0 เป็น 0.5 และ 1.0 กำลังคดของคอนกรีตและค่าการแอ่นตัวมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติม PVA เท่ากับ ร้อยละ 1.5 และ 2.0 กำลังคดของคอนกรีตมีค่าลดลงตามลำดับ

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัด (Flexural Strength) และปริมาณ PVA แสดงดังรูปที่ 4.13 จะเห็นว่า ที่ปริมาณ PVA เท่ากัน กำลังดัดมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 20/80 โดยที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 20/80 ให้ค่ากำลังดัดสูงสุดเท่ากับ 8.66 MPa นอกจากนี้ยังพบว่า ค่ากำลังดัดที่อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70 มีค่าสูงกว่าอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 0 และ 0.5 หลังจากนั้นกำลังดัดของอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70 มีค่าต่ำกว่าอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 และเมื่อเปรียบเทียบกำลังดัดในรูปที่ 4.5 4.9 และ 4.13 พบว่ากำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มในทุกอัตราส่วนผสม

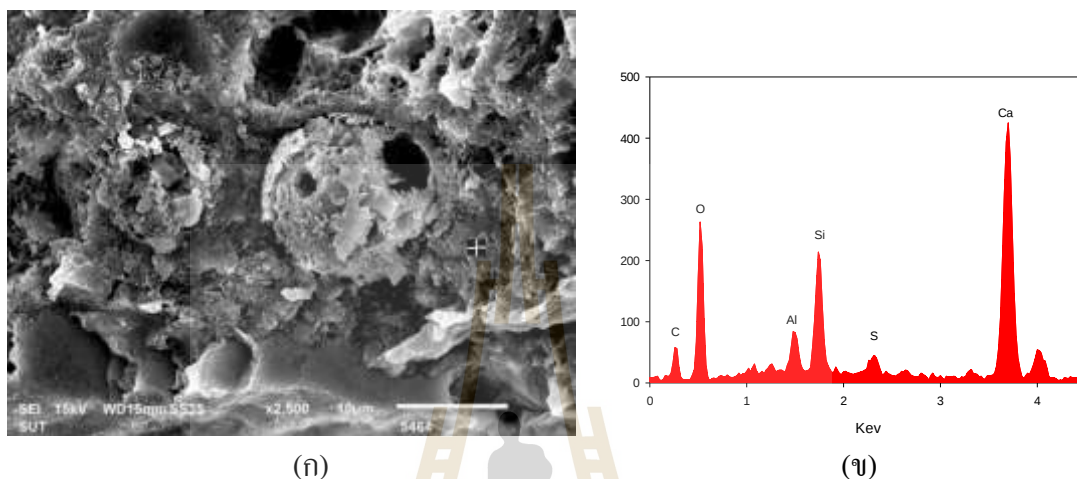


รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดต่อปริมาณ PVA ที่อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 20/80 และ 30/70 ที่อายุบ่ม 60 วัน

4.3 ภาพขยายกำลังสูงของอนุภาคตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง โดยวิธี SEM และ EDX

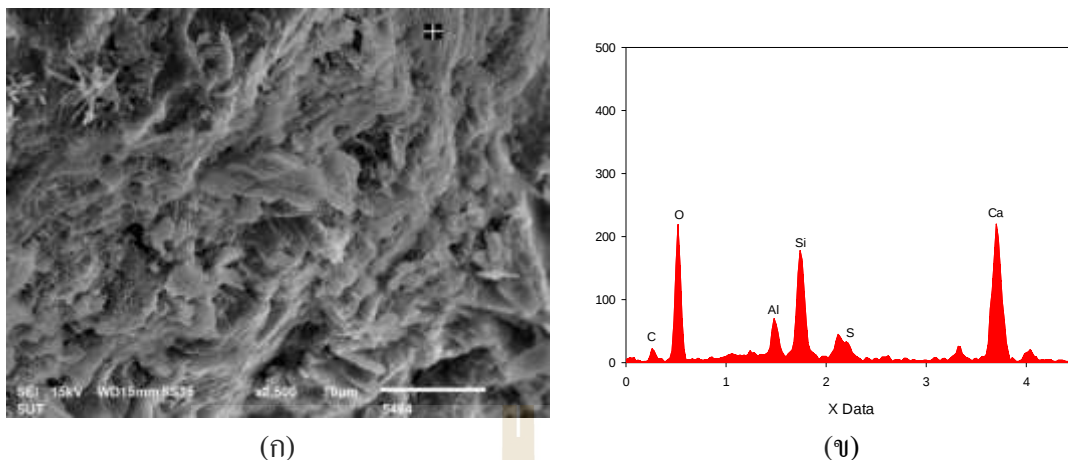
(Scanning Electronic Microscope and Energy-dispersive X-ray spectroscopy)

4.3.1 ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 ปริมาณ PVA ร้อยละ 0 1.0 และ 2.0 ที่อายุบ่ม 60 วัน



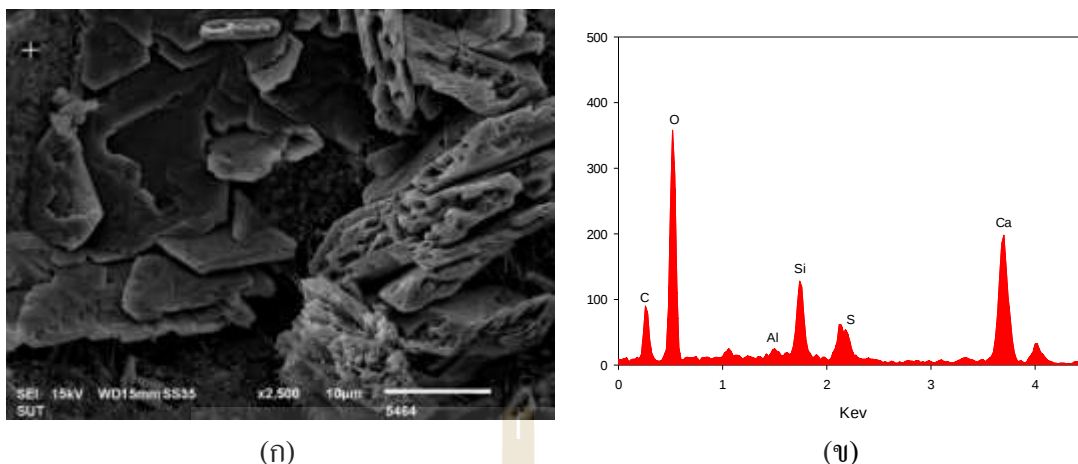
รูปที่ 4.14 (ก) รูป SEM ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 (ข) กราฟ EDX ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90

จากรูปที่ 4.14 (ก) แสดงพื้นผิวที่เสียหายอย่างมากของเกล็ดลอยเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างสารประกอบ SiO_2 และ Al_2O_3 ในเกล็ดลอยกับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ได้เป็น C-S-H และ C-A-H ซึ่งช่วยเพิ่มกำลังรับแรงคดของตัวอย่าง โดยเห็นได้จากปริมาณ Ca Si และ Al มีค่าที่สูงแสดงดังรูปที่ 4.14 (ข) เนื่องการเติบโตของ C-S-H และ C-A-H เกิดได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.15 (ก) รูป SEM ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 (ข) กราฟ EDX ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90

จากรูปที่ 4.15 (ก) จะเห็นได้ว่าการเติม PVA ร้อยละ 1.0 ทำให้เกิดแผ่นฟิล์ม PVA ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบางกระจายตัวอยู่เต็มพื้นที่ แผ่นฟิล์มนี้ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดและความเครียดดัดของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติม PVA แต่ในขณะเดียวกันจะเห็นได้ว่าแผ่นฟิล์มได้ปกคลุมพื้นผิวบางส่วนของเส้นลวด ส่งผลให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งสารประกอบ SiO_2 และ Al_2O_3 จากเส้นลวดถูกชะล้างได้น้อยลง ทำให้การเกิด C-S-H และ C-A-H ลดลง ทำให้ปริมาณของ Ca Si และ Al มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติม PVA ดังรูปที่ 4.15 (ข) อย่างไรก็ตามผลทดสอบแรงดัดแสดงให้เห็นว่าการใช้ PVA ร้อยละ 1.0 ทำให้กำลังดัดและความเครียดดัดของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติม PVA

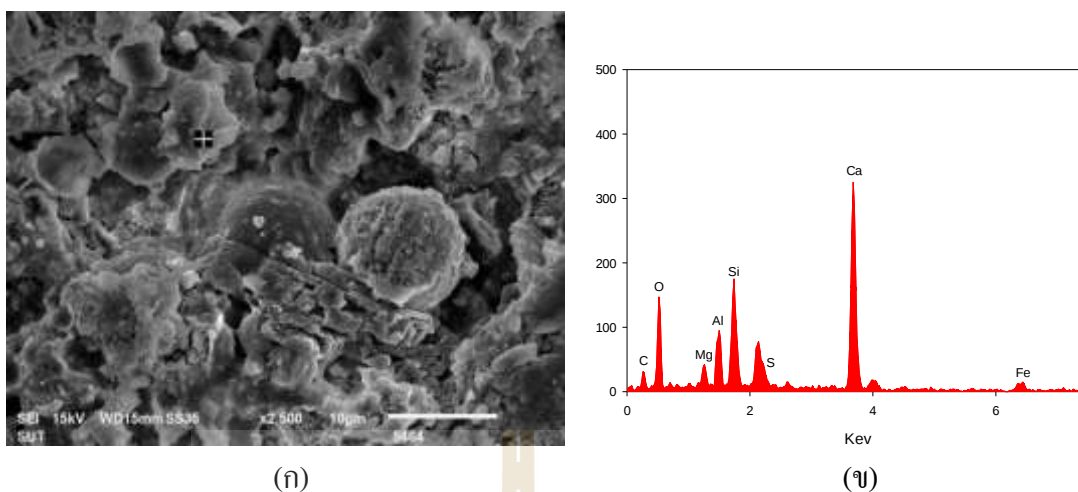


รูปที่ 4.16 (ก) รูป SEM ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 (ข) กราฟ EDX ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90

รูปที่ 4.16 (ก) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงลักษณะของแผ่นฟิล์มที่มีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.15 (ก) เนื่องจากการเติม PVA ในปริมาณที่มากขึ้น (ร้อยละ 2.0) แผ่นฟิล์มที่หนาขึ้นนี้ส่งผลให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างมาก ทำให้การเติบโตของ C-S-H และ C-A-H ไม่สมบูรณ์ เห็นได้จากปริมาณของ Ca Si และ Al ในรูปที่ 4.15 (ข) มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การเติม PVA ร้อยละ 0 และ 1.0 (รูปที่ 4.13 (ข) และ 4.14 (ข) ตามลำดับ) ซึ่งส่งผลให้กำลังดัดของตัวอย่างเมื่อเติม PVA ร้อยละ 2.0 มีค่าต่ำที่สุด

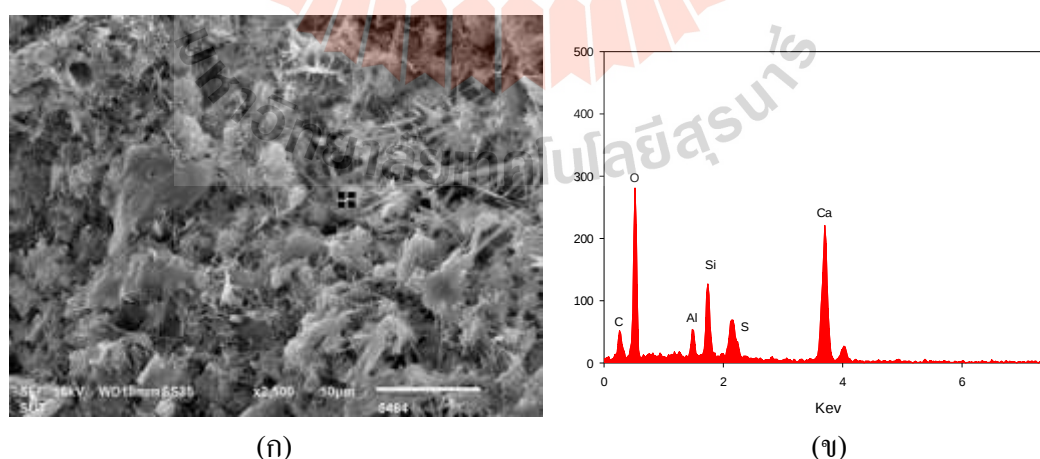
จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าตัวอย่างที่เติม PVA ร้อยละ 1 สำหรับอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90 ที่อายุบ่ม 60 วัน มีการพัฒนากำลังต้านทานแรงดัดได้สูงสุด เนื่องจากการเติม PVA ก่อให้เกิดแผ่นฟิล์มที่ช่วยในการเสริมความต้านทานดัดของคอนกรีต ขณะเดียวกันการเติม PVA เพียงร้อยละ 1.0 ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานียังสามารถเกิดได้บางส่วนทำให้กำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเติม PVA ในปริมาณที่มากเกินไป (ร้อยละ 2) ทำให้แผ่นฟิล์ม PVA ที่ปกคลุมเถ้าลอยมีความหนาเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการหน่วงปฏิกิริยาปอซโซลานีอย่างมาก มีการพัฒนากำลังรับแรงดัดได้น้อยและทำให้กำลังดัดมีค่าลดลง

4.3.2 ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 20/80 ปริมาณ PVA ร้อยละ 0 1.0 และ 2.0 ที่อายุบ่ม 60 วัน



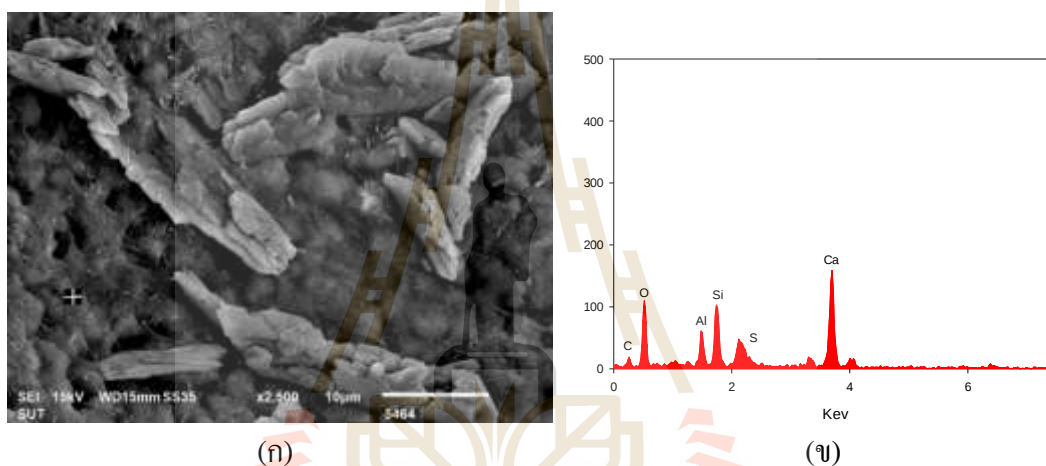
รูปที่ 4.17 (ก) รูป SEM ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 20/80 (ข) กราฟ EDX ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 20/80

จากรูปที่ 4.17 (ก) แสดงพื้นผิวที่เสียหายอย่างมากของเถ้าลอยเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างสารประกอบ SiO_2 และ Al_2O_3 ในเถ้าลอยกับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ได้เป็น C-S-H และ C-A-H ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดัดของตัวอย่าง โดยเห็นได้จากปริมาณ Ca Si และ Al มีค่าที่สูงแสดงดังรูปที่ 4.17 (ข) เนื่องการเติบโตของ C-S-H และ C-A-H เกิดได้อย่างสมบูรณ์ เช่นเดียวกับกับการใช้อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 10/90



รูปที่ 4.18 (ก) รูป SEM ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 20/80 (ข) กราฟ EDX ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 20/80

จากรูปที่ 4.18 (ก) จะเห็นได้ว่าการเติม PVA ร้อยละ 1.0 ทำให้เกิดแผ่นฟิล์ม PVA ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบางกระจายตัวอยู่เต็มพื้นที่ แผ่นฟิล์มนี้ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดและความเครียดดัดของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติม PVA แต่ในขณะเดียวกันจะเห็นได้ว่าแผ่นฟิล์มได้ปกคลุมพื้นผิวบางส่วนของเส้นลวดส่งผลให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งสารประกอบ SiO_2 และ Al_2O_3 จากเส้นลวดถูกชะล้างมาได้น้อยลงทำให้เกิด C-S-H และ C-A-H ลดลง ทำให้ปริมาณของ Ca Si และ Al มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติม PVA ดังรูปที่ 4.18 (ข) อย่างไรก็ตามผลทดสอบแรงดัดแสดงให้เห็นว่าการใช้ PVA ร้อยละ 1.0 ทำให้กำลังดัดและความเครียดดัดของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติม PVA



รูปที่ 4.19 (ก) รูป SEM ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 20/80 (ข) กราฟ EDX ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 20/80

จากรูปที่ 4.19 (ก) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงลักษณะของแผ่นฟิล์มที่มีความหนามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.18 (ก) เนื่องจากการเติม PVA ในปริมาณที่มากขึ้น (ร้อยละ 2.0) แผ่นฟิล์มที่หนาขึ้นนี้ส่งผลให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างมาก ทำให้การเติบโตของ C-S-H และ C-A-H เป็นไปได้อย่างไม่สมบูรณ์ เห็นได้จากปริมาณของ Ca Si และ Al ในรูปที่ 4.19 (ข) มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเติม PVA ร้อยละ 0 และ 1.0 (รูปที่ 4.17 (ข) และ 4.18 (ข) ตามลำดับ) ซึ่งส่งผลให้กำลังดัดของตัวอย่างเมื่อเติม PVA ร้อยละ 2.0 มีค่าต่ำที่สุด

จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าตัวอย่างที่เติม PVA ร้อยละ 1 สำหรับอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 20/80 ที่อายุบ่ม 60 วัน มีการพัฒนากำลังต้านทานแรงดัดได้สูงสุด เนื่องจากการเติม PVA ก่อให้เกิดแผ่นฟิล์มที่ช่วยในการเสริมความต้านทานดัดของคอนกรีต ขณะเดียวกัน

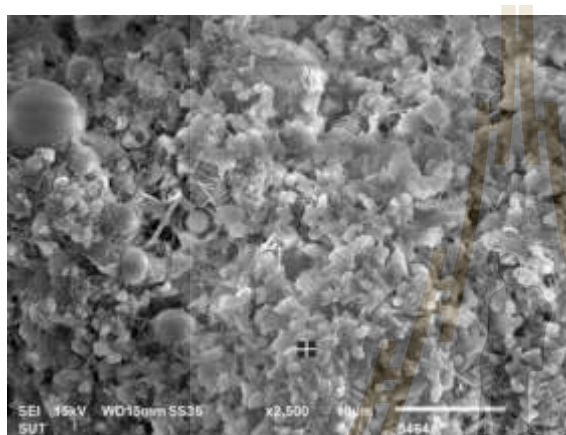
การเติม PVA เพียงร้อยละ 1.0 ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกยังสามารถเกิดได้บางส่วนทำให้กำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเติม PVA ในปริมาณที่มากเกินไป (ร้อยละ 2) ทำให้แผ่นฟิล์ม PVA ที่ปกคลุมเถาวัลย์มีความหนาแน่นขึ้นส่งผลต่อการหน่วงปฏิกิริยาปอซโซลานิกอย่างมาก ทำให้มีการพัฒนากำลังรับแรงดัดได้น้อยและทำให้กำลังดัดมีค่าลดลง การใช้ FA/c เท่ากับ 20/80 ให้ค่ากำลังดัดสูงกว่าการใช้ FA/c เท่ากับ 10/90 สำหรับทุกปริมาณของ PVA เนื่องจากปริมาณเถาวัลย์ที่เพิ่มขึ้นทำให้โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเพิ่มมากขึ้น

4.4.3 ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70 ปริมาณ PVA ร้อยละ 0 1.0 และ 2.0 ที่อายุบ่ม 60 วัน

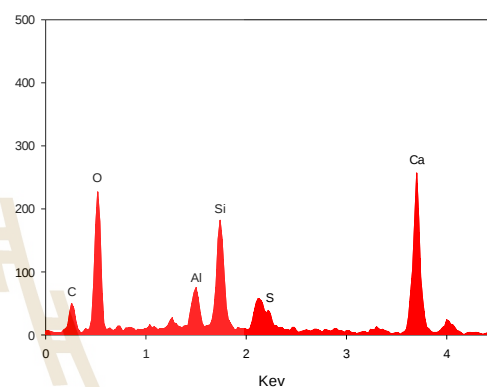
จากรูปที่ 4.20 (ก) แสดงให้เห็นถึงเถาวัลย์บางส่วนซึ่งมีพื้นผิวที่ไม่เกิดการเสียหาย ซึ่งบ่งบอกถึงการใช้อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70 นั้นมีปริมาณเถาวัลย์มากเกินความจำเป็นสำหรับปฏิกิริยาปอซโซลานิก จากรูปที่ 4.21 (ก) จะเห็นได้ว่าการเติม PVA ร้อยละ 1.0 ทำให้เกิดแผ่นฟิล์ม PVA ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบางกระจายตัวอยู่เต็มพื้นที่ แผ่นฟิล์มนี้ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดและความเครียดดัดของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติม PVA แต่ในขณะเดียวกันจะเห็นได้ว่าแผ่นฟิล์มได้ปกคลุมพื้นผิวบางส่วนของเถาวัลย์ส่งผลให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งสารประกอบ SiO_2 และ Al_2O_3 จากเถาวัลย์ถูกชะล้างมาทำปฏิกิริยาได้น้อยลงทำให้การเกิด C-S-H และ C-A-H ลดลง ทำให้ปริมาณของ Ca Si และ Al ในรูปที่ 4.21 (ข) มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติม PVA (รูปที่ 4.20 (ข)) นอกจากนี้ในรูปที่ 4.21 (ก) ยังแสดงให้เห็นถึงเถาวัลย์บางส่วนซึ่งมีพื้นผิวที่ไม่เกิดการเสียหาย เช่นเดียวกับการไม่เติม PVA ซึ่งบ่งบอกถึงการใช้อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70 ส่งผลให้มีปริมาณเถาวัลย์มากเกินความจำเป็นสำหรับปฏิกิริยาปอซโซลานิก อย่างไรก็ตามผลทดสอบแรงดัดแสดงให้เห็นว่าการใช้ PVA ร้อยละ 1.0 ทำให้กำลังดัดและความเครียดดัดของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติม PVA จากรูปที่ 4.22 (ก) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงลักษณะของแผ่นฟิล์มที่มีความหนาแน่นขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.21 (ก) เนื่องจากการเติม PVA ในปริมาณที่มากขึ้น (ร้อยละ 2.0) แผ่นฟิล์มที่หนาขึ้นนี้ส่งผลให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างมาก ทำให้การเติบโตของ C-S-H และ C-A-H เป็นไปได้อย่างไม่สมบูรณ์ เห็นได้จากปริมาณของ Ca Si และ Al ในรูปที่ 4.22 (ข) มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการเติม PVA ร้อยละ 0 และ 1.0 (รูปที่ 4.20 (ข) และ 4.21 (ข) ตามลำดับ) สอดคล้องกับผลทดสอบกำลังดัดของตัวอย่างเมื่อเติม PVA ร้อยละ 2.0 มีค่าต่ำที่สุด

จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างที่เติม PVA ร้อยละ 1.0 สำหรับอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70 ที่อายุบ่ม 60 วัน มีการพัฒนากำลังต้านทานแรงดัดได้สูงสุดเนื่องจากการเติม PVA ก่อให้เกิดแผ่นฟิล์มที่ช่วยในการเสริมความต้านทานดัดของคอนกรีต ขณะเดียวกัน

การเติม PVA เพียงร้อยละ 1.0 ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกยังสามารถเกิดได้ทำให้กำลังคัมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70 ทำให้มีเถ้าลอยส่วนเกินซึ่งไม่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก และการเติม PVA ในปริมาณที่มากเกินไป (ร้อยละ 2) ทำให้แผ่นฟิล์ม PVA ที่ปกคลุมเถ้าลอยมีความหนาเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการหน่วงปฏิกิริยาปอซโซลานิกอย่างมาก ทำให้มีการพัฒนากำลังรับแรงคัได้น้อยและทำให้กำลังคัมีค่าลดลง ด้วยเหตุนี้เมื่อการแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากเกินไป (FA/c = 30/70) และการใช้ปริมาณ PVA ที่มากเกินไป (ร้อยละ 2.0) ส่งผลให้กำลังคัของตัวอย่างมีค่าต่ำที่สุด

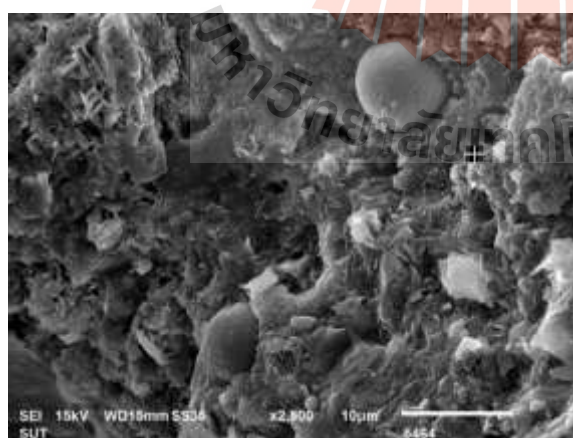


(ก)

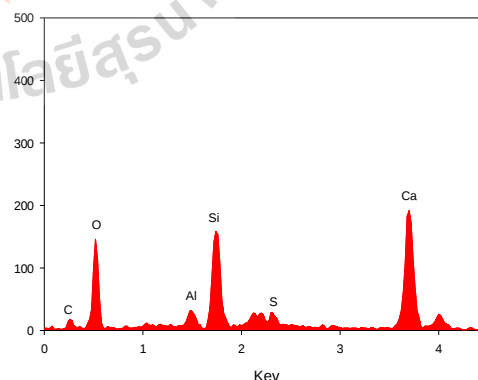


(ข)

รูปที่ 4.20 (ก) รูป SEM ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70 (ข) กราฟ EDX ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70

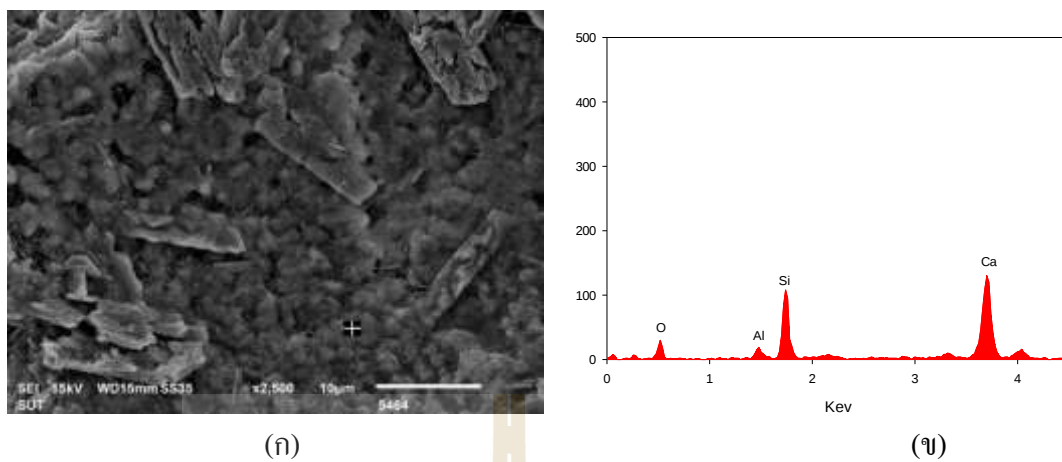


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.21 (ก) รูป SEM ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70 (ข) กราฟ EDX ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70



รูปที่ 4.22 (ก) รูป SEM ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70 (ข) กราฟ EDX ของตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 2.0 และอัตราส่วน FA/c เท่ากับ 30/70



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการพัฒนาองค์ประกอบของคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบ (Recycle Concrete Aggregate) ปรับปรุงด้วยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และเถ้าลอย (FA) สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

- 1) ในทุกอัตราส่วนการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ (FA/c) องค์ประกอบของตัวอย่างในระยะต้น (อายุบ่ม 7 วัน) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PVA จนถึงปริมาณ 1.0 หลังจากนั้นองค์ประกอบมีค่าลดลงเมื่อ PVA มีปริมาณเพิ่มขึ้น และที่องค์ประกอบมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วน FA/c มีค่าเพิ่มขึ้น ตัวอย่างที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 และ FA/c เท่ากับ 10/90 ให้ค่าองค์ประกอบสูงสุด
- 2) ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน ในทุกอัตราส่วน FA/c องค์ประกอบมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PVA จนถึงปริมาณ PVA ร้อยละ 1.0 หลังจากนั้นองค์ประกอบมีค่าลดลงเมื่อ PVA มีปริมาณเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับอายุบ่ม 7 วัน อย่างไรก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับภาพขยายกำลังสูงของอนุภาคตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง โดยวิธี SEM และ EDX ของตัวอย่างที่อายุบ่ม 60 วัน ที่แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่เติม PVA ร้อยละ 1.0 ก่อให้เกิดแผ่นฟิล์มที่ช่วยในการเสริมความต้านทานอัดของคอนกรีต การเติม PVA ในปริมาณที่มากเกินไปทำให้แผ่นฟิล์ม PVA มีความหนาเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการหน่วงปฏิกิริยาปอซโซลานีอย่างมาก ทำให้มีการพัฒนาองค์ประกอบรับแรงอัดได้น้อย ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วน FA/c ที่เหมาะสมคือ 20/80 การแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากเกินไป (FA/c เท่ากับ 30/70) ทำให้มีเถ้าลอยส่วนเกินซึ่งไม่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานีค ส่งผลให้องค์ประกอบของตัวอย่างมีค่าลดลง

เอกสารอ้างอิง

- ปิตุสานต์ กร้ามาตร. (2553). คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน. คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยชัยภูมิ.
- ขงยุทธ วัฒนกุล. (2554). คุณสมบัติด้านซีเมนต์และ ความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน. มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. ภาควิชา วิศวกรรม โยธา.
- สาโรจน์ ดำรงสีล. (2515). ผลกระทบของการใช้เถ้าแกลบผสมเถ้าลอยต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต. วารสารวิชาการ และ วิจัย ม.ทร. พระนคร, 2015. 9(1): p. 125-133.
- สุรสิทธิ์ เนาะบุญ และ ปิตุสานต์ กร้ามาตร. (2556). ผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนต่อกำลังอัดประลัยกำลังดึงแบบผ่าซีก และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน. วารสารวิศวกรรมศาสตร์. คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- อดิญา ตัญเจริญ. (2558). ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานจากปอซโซลานชนิดวัสดุเหลือทิ้งทางอุตสาหกรรมเกษตร. Proceedings of 53rd Kasetsart University Annual Conference: Science, Genetic Engineering, Architecture and Engineering, Agro-Industry, Natural Resources and Environment สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตร ศาสตร์ ครั้งที่ 53 2558.
- Allahverdi, A., Kianpur, K., and Moghbeli, M. (2010). **Effect of polyvinyl alcohol on flexural strength and some important physical properties of Portland cement paste.** Iranian Journal of Materials Science & Engineering., 7(1). P.1-6.
- ASTM C192/C192M-16a **Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, https://doi.org/10.1520/C0192_C0192M-16A [วันที่ 24 มีนาคม 2560]
- ASTM C39/C39M-17a **Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-17A [วันที่ 24 มีนาคม 2560]
- ASTM C293/C293M-16 **Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, https://doi.org/10.1520/C0293_C0293M-16 [วันที่ 24 มีนาคม 2560]

- Arulrajah, A., Disfani, M.M., Haghighi, H., Mohammadinia, A., and Horpibulsuk, S. (2015). **Modulus of rupture evaluation of cement stabilized recycled glass/recycled concrete aggregate blends.** Construction and Building Materials., 84, 146-155.
- Contrafatto, L. (2013). **Mechanical properties of Polyvinyl-Alcohol modified concrete.** Aimeta Conferences, Italy., DOI: 10.13140/2.1.1417.8565.
- Dilbas, H., Şimşek, M., and Çakır, Ö. (2014). **An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume.** Construction and Building Materials., 61, 50-59.
- Jamsawang, P., Voottipruex, P., and Horpibulsuk, S. (2015). **Flexural strength characteristics of compacted-cement-polypropylene fiber-sand.** Journal of Materials in Civil Engineering., 27(9), 04014243(1-9).
- Kim, J-H., and Robertson, RE. (1998). **Effects of Polyvinyl Alcohol on Aggregate-Paste Bond Strength and the Interfacial Transition Zone.** Advanced Cement Based Materials., 8(2), 66-76.
- Kim, Y-Y., Lee, K-M., Bang, J-W., and Kwon, S-J. (2014). **Effect of W/C Ratio on Durability and Porosity in Cement Mortar with Constant Cement Amount.** Advances in Materials Science and Engineering., DOI:10.1155/2014/273460.
- Nguyen, D., Devlin, L., Koshy, P., and Sorrell, C. (2015). **Effect of Polyvinyl Alcohol on Rheology of Portland Cement Pastes.** Journal of The Australian Ceramic Society., 51(2), 23-28.
- Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Suksiripattanapong, C., Udomchai, A. (2016). **Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer.** Applied Clay Science., 127-128, 134-142.
- Tam, V.W., X. Gao, and C. Tam. (2005). **Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach.** Cement and concrete research, 2005. 35(6): p. 1195-1203.
- TopiČ, J., et al. (2015). **Effect of Pva Modification on Properties of Cement Composites.** Acta Polytechnica, 2015. 55(1): p. 64-75.

- Thong, CC., Teo, DCL., and Ng, CK. (2016). **Application of polyvinyl alcohol (PVA) in cement-based composite materials: A review of its engineering properties and microstructure behavior.** Construction and Building Materials, 107, 172-180.
- Viswanath, P. and E.T. Thachil. (2008). **Properties of polyvinyl alcohol cement pastes.** Materials and Structures, 2008. 41(1): p. 123-130.





ตัวอย่างชุดข้อมูล

Deformation (mm.)	Flexuaral Strength (MPa.)
0	0
0.06921	0.10565369
0.10876	0.212127763
0.19774	0.31696107
0.26695	0.422614759
0.34604	0.739575494
0.40536	1.056536899
0.47457	1.267844278
0.59321	1.796112393
0.62287	2.218727152
0.6822	2.746995936
0.7514	3.380918075
0.82061	4.014840215
0.87993	4.860069733
0.94914	5.599645228
0.99858	6.656182126
1.07767	7.60706567
1.15677	8.66359922

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{จากสูตร Flexural Strength} &= 3PL/2bd^2 \\
 \text{กำหนดให้ P(หน่วยแรงประลัย)} &= 16.502 \text{ KN.} \\
 L &= 350 \text{ mm} \\
 b &= 100 \text{ mm} \\
 d &= 100 \text{ mm} \\
 &= 3(16502)(350)/(2*100)(100^2) \\
 \text{Flexural Strength} &= 8.66355 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

ประวัติผู้เขียน

นายอลงกรณ์ กว้างพิมาย เกิดเมื่อวันที่ 23 มกราคม 2535 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนมัธยมสุรธรรมพิทักษ์ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สำนักวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2557 ปัจจุบันปฏิบัติงานอยู่ห่างหุ้นส่วนจำกัด พงษ์พิมายก่อสร้าง ในตำแหน่ง วิศวกรโยธา มีความสนใจในสาขาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค จึงเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สำนักวิศวกรรมศาสตร์ สาขาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2558

