



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา	วิศวกรรมโยธา
สาขา	ภาควิชา
เรื่อง	การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของคอนกรีตผสมเส้นใยแบบสองประสาน
	Comparison of Mechanical Properties and Durability of Hybrid Fibers Reinforced Concrete
นามผู้วิจัย	นางสาวพัชราภรณ์ ทำบุญ
ได้พิจารณาเห็นชอบโดย	
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	( รองศาสตราจารย์สุวิมล สัจจาณิชย์, Ph.D. )
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	( รองศาสตราจารย์ประเสริฐ สุวรรณวิทยา, Ph.D. )
หัวหน้าภาควิชา	( ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ, D.Eng. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของคอนกรีตผสมเส้นใยแบบสองประสาน

Comparison of Mechanical Properties and Durability of Hybrid Fibers Reinforced Concrete

โดย

นางสาวพัชราภรณ์ ทำบุญ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พัชราภรณ์ ทำบุญ 2557: การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของคอนกรีตผสมเส้นใยแบบสองประสาน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์สุวิมล สัจจาวิชย์, Ph.D. 96 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลและความคงทนระหว่างคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใย (FRC) ชนิดเดี่ยวและสองชนิดใช้ร่วมกัน โดยใช้เส้นใยเหล็กและเส้นใยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และใช้ปริมาณของเส้นใยผันแปรระหว่างร้อยละ 0.5-1.0 โดยปริมาตร และคอนกรีตที่ใช้เส้นใยสองชนิดร่วมกันมีปริมาณของเส้นใยโดยรวมร้อยละ 1.0 ผลการศึกษาพบว่า การผสมเส้นใยไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมากนัก แต่ปริมาณเส้นใยที่มากขึ้นทำให้ความสามารถได้ลดลง เส้นใย PVA ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเทได้สูงกว่าเส้นใยเหล็ก การผสมเส้นใยในคอนกรีตช่วยเพิ่มแรงคงค้างหลังจากเกิดการแตกร้าวครั้งแรก เพิ่มความสามารถดูดซับพลังงาน คอนกรีตจึงไม่เกิดการวิบัติโดยเฉียบพลัน ทั้งนี้เส้นใยเหล็กเหล็กส่งผลดีต่อพฤติกรรมการรับแรงดัดมากกว่าเส้นใย PVA คอนกรีตผสมเส้นใยสองชนิดมีพฤติกรรมแบบ Deflection Hardening การใช้เส้นใยสองชนิดร่วมกันช่วยการลดการหดตัวทั้งแบบพลาสติกและแบบแห้งได้มากกว่าส่วนผสมที่ใช้เส้นใยชนิดเดี่ยวและคอนกรีตธรรมดา โดยคอนกรีตผสมเส้นใย PVA มีประสิทธิภาพของความต้านทานต่อการหดตัวดีกว่าส่วนผสมที่ใช้เส้นใยเหล็กแต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของเส้นใย PVA ที่ใช้ ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตผสมเส้นใยมีค่าประมาณ  $10-11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  ใกล้เคียงกันทุกอัตราส่วน เมื่อพิจารณาความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ ในสภาวะเปียกตลอดเวลา คอนกรีตผสมเส้นใยสองชนิดช่วยต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ได้ดีกว่าเส้นใยชนิดเดี่ยว โดยที่ PVA ต้านทานได้ดีกว่าเหล็ก แต่ในทางกลับกัน ในสภาวะเปียกสลับแห้งส่วนผสมที่มี PVA สูงมีการซึมผ่านของคลอไรด์ได้มากกว่า

Patcharaporn Tumboon 2014: Comparison of Mechanical Properties and Durability of Hybrid Fibers Reinforced Concrete. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Suvimol Sujjavanich, Ph.D. 96 pages.

This research reported the comparative study of mechanical properties and chloride penetration resistance between plain concrete and fibers reinforced concrete (FRC), using mono and hybrid type fiber. In the study, concrete with single type ; steel fiber and polyvinyl alcohol (PVA), with percentage variation of 0.5 and 1.0 by volume and the hybrid composite concrete using the percentage combination of one for both fibers were investigated. Increasing PVA content significantly reduced concrete workability, compared to that of steel fibers. The fibers slightly affected the compressive strength of concrete. However, incorporating fibers in the matrix improved the load carrying capacity after the first crack. The increased energy absorption was observed, this prevented the sudden failure after the ultimate load. Concrete with steel fibers showed the better improvement in flexural behavior than that of PVA. The behavior improvement of hybrid FRC indicated deflection hardening behavior. The hybrid fibers also reduced the plastic and drying shrinkage in concrete better than that of the single type and plain concrete. The performance in reducing shrinkage depended on the amount of addition PVA. The average coefficient of thermal expansion of about  $10-11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  was in the same range for all mixtures. The hybrid FRC concrete showed the better resistance to chloride penetration than those of mono fibers under the continuous wet condition. However, under wet and dry conditions, the effect of hybrid fibers was slight.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์สุวิมล สัจจาณิชย์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลัก สำหรับการช่วยเหลือในทุกๆด้านทั้งการให้คำปรึกษา แนวความคิดในการทำวิจัย  
สนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือและเงินทุน ทั้งยังเป็นกำลังใจและคอยชี้แนะการทำงาน รวมไปถึงการ  
ใช้ชีวิต และขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ประเสริฐ สุวรรณวิทยา สำหรับคำแนะนำ กำลังใจใน  
การทำงาน ทุกสิ่งคือองค์ประกอบที่ทำให้การวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ถ่ายทอดความรู้อันเป็นประโยชน์  
อย่างยิ่งในการนำไปประยุกต์ใช้ในการทำงานต่อไป ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรภาควิชา  
วิศวกรรมโยธา ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกเรื่องเครื่องมือ สถานที่ คำแนะนำและความ  
ช่วยเหลือในการทดสอบและเตรียมอุปกรณ์ รวมถึง อ.ชนวัฒน์ มีศักดิ์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ  
อ.ดร.ศิริเดช สุริต คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ และคุณอรุณ วงศ์สุวรรณ ในความอนุเคราะห์เรื่อง  
อุปกรณ์และคำแนะนำ

ขอขอบพระคุณบริษัทบริษัท ชิก้า (ประเทศไทย) จำกัด ในความอนุเคราะห์สนับสนุนน้ำยา  
ผสมคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และนิสิตวิศวกรรมโครงสร้างทุกท่านที่ช่วยทั้งร่างกายและแรงใจ ทำ  
ให้การวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ด้วยประโยชน์อันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์นี้ขอมอบคุณความดีทั้งหมดให้แก่บิดา มารดา  
ของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจหลักและให้ความสนับสนุนมาโดยตลอด และขอให้คุณความดีส่งต่อไปสู่ผู้ที่  
เกี่ยวข้องในการวิจัยทุกท่านที่ทำให้การวิจัยนี้สำเร็จ

พัชราภรณ์ ทำบุญ

กรกฎาคม 2557

## สารบัญ

## หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	23
อุปกรณ์	23
วิธีการ	30
ผลและวิจารณ์	38
สรุปและข้อเสนอแนะ	63
สรุป	63
ข้อเสนอแนะ	65
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	66
ภาคผนวก	72
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบวัสดุ	73
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล และความคงทน	78
ภาคผนวก ค วิธีการดำเนินการวิจัย	92
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	96

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติของเส้นใย	25
2	อัตราส่วนผสมโดยปริมาตรของเส้นใยในคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา	27
3	พฤติกรรมการโก่งตัว แรงคงค้าง การดูดซับพลังงาน และความเหนียวของชิ้นตัวอย่าง	48
ตารางผนวกที่		
ก1	ขนาดคละของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษา	74
ก2	ขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษา	75
ก3	ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษา	76
ก4	ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษา	77
ก5	น้ำหนักจำเพาะของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษา	77
ข1	ผลการทดสอบกำลังรับแรงค้ำ	83
ข2	การหัดตัวอิสระของคอนกรีตแบบแห้ง	87
ข3	การหัดตัวแบบพลาสติกโดยการประเมินจากรอยร้าว	88
ข4	การหัดตัวแบบพลาสติกโดยการวิเคราะห์จากภาพถ่ายผ่านเลนส์	89
ข5	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	89
ข6	ปริมาณคลอไรด์ที่ความลึกต่างๆของคอนกรีตในสภาวะอิมมัวและเปียกสลับแห้ง	90
ค1	คุณสมบัติของเส้นใยชนิดต่างๆ	93

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 พฤติกรรม (ก)Strain-Hardening และ(ข)Strain-Softening ของคอนกรีตผสมเส้นใย	8
2 กระบวนการผลิต PVA	10
3 โครงสร้างของPVA	10
4 เส้นใยเหล็กแบบต่างๆ	11
5 ลักษณะที่ใช้ในการศึกษา (ก) เส้นใยเหล็ก (ข) เส้นใยPVA	25
6 แผนภูมิการทดสอบทั้งหมด	28
7 ขนาดของตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา	29
8 การหาค่าแรงคงค้าง	32
9 การหาค่าดัชนีความเหนียว	33
10 การทดสอบการหดตัวของแบบพลาสติก โดยวิธีการขยายภาพผ่านเลนส์	35
11 การทดสอบการขยายตัวเนื่องจากความร้อน	35
12 ตัวอย่างการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของคลอไรด์	36
13 ผลการศึกษาค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเส้นใยเหล็กต่อเส้นใย PVA ต่างกัน	39
14 การกระจายตัวของเส้นใยในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนเส้นใยเหล็กต่อเส้นใย PVA ต่างกัน	40
15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดกับการเสียรูปของคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเดี่ยวและสองชนิด	42
16 ความสามารถในการรับกำลังแรงอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดี่ยวและสองชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา	42
17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตัดกับการแ่นตัวของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเดี่ยวในปริมาณต่างกัน	44
18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตัดกับการแ่นตัวของคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเดี่ยวและสองชนิดที่มีปริมาณเส้นใยรวม 1.0%	45
19 แรงคงค้างของคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดี่ยวและสองชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา	48

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	การดูดซับพลังงานและความเหนียวของคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดี่ยวและสองชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา	49
21	ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวอิสระของคอนกรีตแบบแห้งกับระยะเวลาของคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเดี่ยวและสองชนิด	50
22	ความกว้างรอยร้าวของคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเดี่ยวและสองชนิด	52
23	ความกว้างรอยร้าวของคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเดี่ยวและสองชนิด	52
24	ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบพลาสติกกับระยะเวลาของคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเดี่ยวและสองชนิด	54
25	การหดตัวทั้งแบบแห้งและแบบพลาสติกของคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดี่ยวและสองชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา	55
26	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเดี่ยวและสองชนิด	56
27	การเกิดสนิมเป็นจุดบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตตัวอย่างในสภาวะเปียกสลับแห้ง	57
28	การเกิดสนิมเป็นจุดบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตตัวอย่างในสภาวะอิมมัวจากคลอไรด์ตลอดเวลา	57
29	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นคลอไรด์กับความลึกจากผิวของคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเดี่ยวและสองชนิด ในสภาวะอิมมัวตลอดเวลา	58
30	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นคลอไรด์กับความลึกจากผิวของคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเดี่ยวและสองชนิด ในสภาวะเปียกสลับแห้ง	59
31	การซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดี่ยวและสองชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา	61
32	ภาพถ่ายโดยกล้อง Optical Microscope ของ (ก) คอนกรีตธรรมดา, (ข), (ค) คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก, (ง) คอนกรีตผสมเส้นใย PVA	62

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 ขนาดผลของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษา	75
ก2 ขนาดผลของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษา	76
ข1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตธรรมดา	79
ข2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใย PVA 0.5% โดยปริมาตร	79
ข3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใย PVA 1.0% โดยปริมาตร	80
ข4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 0.5% โดยปริมาตร	80
ข5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 1.0% โดยปริมาตร	81
ข6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก และPVA 0.5:0.5% โดยปริมาตร	81
ข7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก และPVA 0.25:0.75% โดยปริมาตร	82
ข8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก และPVA 0.75:0.25% โดยปริมาตร	82
ข9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตธรรมดา	83
ข10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใย PVA 0.5% โดยปริมาตร	84
ข11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใย PVA 1.0% โดยปริมาตร	84
ข12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 0.5% โดยปริมาตร	85
ข13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 1.0% โดยปริมาตร	85

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นคัตและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กและPVA 0.5:0.5% โดยปริมาตร	86
ข15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นคัตและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กและPVA 0.75:0.25% โดยปริมาตร	86
ข16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นคัตและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กและPVA 0.75:0.25% โดยปริมาตร	87
ข17 รอยร้าวจากการหดตัวแบบพลาสติก	88
ค1 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล (ก) การทดสอบกำลังรับแรงอัด (ข) การทดสอบกำลังรับแรงคัต	93
ค2 ตัวอย่างคอนกรีตผสมเส้นใยหลังจากการทดสอบกำลังรับแรงคัต (ก) คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก (ข)คอนกรีตผสมเส้นใยPVA	94
ค4 การทดสอบการหดตัวพลาสติกของคอนกรีตสด (ก) แบบหล่อคอนกรีตในการทดสอบ (ข) ลักษณะรอยร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก	95
ค5 การทดสอบการซึมผ่านคลอไรด์ (ก) การเจาะเก็บผงคอนกรีตตัวอย่าง (ข) เครื่อง Ion-selective-electrode	95

## การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของคอนกรีต ผสมเส้นใยแบบสองประสาน

### Comparison of Mechanical Properties and Durability of Hybrid Fibers Reinforced Concrete

#### คำนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุประสมที่มีความสามารถต้านทานแรงดึงต่ำ ทำให้มีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้ในบางกรณี เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุประกอบจาก ซีเมนต์ หิน ทราย จึงมีรอยต่อบริเวณผิวสัมผัส (Interfacial Transition Zone, ITZ) จำนวนมากซึ่งเป็นจุดอ่อนของคอนกรีต เนื่องจากในบริเวณ ITZ นี้มักมีรอยร้าวขนาดเล็กตามธรรมชาติ ซึ่งสามารถขยายเป็นรอยร้าวที่มีขนาดใหญ่ได้เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกถึงระดับหนึ่ง ดังนั้นการแตกร้าวจึงเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้คอนกรีตรับแรงดึงได้ต่ำ เนื่องจากการแตกร้าวทำให้คอนกรีตสูญเสียความแข็งแรงและส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต การแตกร้าวสามารถเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น การแตกร้าวที่เกิดจากแรงกระทำจากภายนอก การแตกร้าวจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีในเนื้อคอนกรีต และการแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวของคอนกรีต เป็นต้น

การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบหลักๆ คือ การแตกร้าวจากการหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage Cracking) ที่เกิดขึ้นในช่วงที่ยังเป็นคอนกรีตสดและสูญเสียน้ำจากการระเหยบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตหรือเกิดจากการคูดน้ำของเม็ดปูนซีเมนต์บางส่วนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา

ไฮเดรชัน ซึ่งทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัว (Hermite, 1960) รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะที่ไม่แน่นอน (Nemkumar and Gupta, 2006) และเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วบริเวณผิวที่มีความชื้นต่ำกว่าความชื้นในช่องว่างคาปิลารี เป็นผลให้น้ำภายในเนื้อคอนกรีตเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอก ทำให้เกิดการแตกร้าวจากการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage Cracking) นอกจากนี้ การที่วัสดุส่วนประกอบของคอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดการยึดรั้งบริเวณรอยต่อของวัสดุแต่ละชนิด ทำให้เกิดการแตกร้าว และเมื่อคอนกรีตได้รับแรงกระทำจาก

ภายนอก รอยแตกร้าวขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจำนวนมากเหล่านี้ ก็จะขยายใหญ่ขึ้นและเชื่อมต่อกัน ทำให้รอยร้าวขยายยาวขึ้นจนทำให้คอนกรีตสูญเสียกำลังและทำให้สารที่เป็นอันตรายจากภายนอกสามารถเข้าสู่ภายในคอนกรีตได้ง่ายขึ้นเป็นหนึ่งสาเหตุที่ส่งผลให้คอนกรีตเสื่อมสภาพเร็วยิ่งขึ้น

แนวความคิดของการนำเส้นใยใช้ร่วมกับคอนกรีตในลักษณะคอนกรีตผสมเส้นใย (Fiber Reinforced Concrete, FRC) มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยลดการแตกร้าวในเนื้อคอนกรีต และยังเป็นผลดีต่อการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการรับแรงดึงของคอนกรีตให้เพิ่มขึ้นด้วยเมื่อเลือกใช้ชนิดของเส้นใยที่เหมาะสม โดยเฉพาะในกรณีที่แรงดึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณา

เส้นใยที่นิยมใช้ในงานคอนกรีตมีหลายชนิดและมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไปเช่น เส้นใยพลาสติกสังเคราะห์มีกำลังต่ำแต่มีความยืดหยุ่นตัวสูงเหมาะกับการใช้ผสมในคอนกรีตเทพื้นที่กว้างๆ เพื่อช่วยลดการแตกร้าวจากการหดตัวของพลาสติกของคอนกรีต นอกจากนั้นค่าโมดูลัสที่ต่ำยังทำให้คอนกรีตสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดี เส้นใยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol, PVA) เป็นเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการพัฒนาคุณสมบัติการรับแรงดึงและการโค้งตัวของคอนกรีตได้เป็นอย่างดี (Etuo and Takahashi, 2008) แต่ยังไม่เป็นที่นิยมใช้มากนักเนื่องจากราคาสูง และในขณะเดียวกันยังมีเส้นใยอีกประเภทหนึ่งที่นิยมใช้เช่นกันคือเส้นใยเหล็กเนื่องจากมีกำลังสูงช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต เส้นใยเหล็กมักจะนำไปใช้ในโครงสร้างที่ต้องการความสามารถในการรับกำลังสูงอีกทั้งเส้นใยเหล็กยังช่วยลดอิทธิพลจากพฤติกรรม Tension stiffening (Seong *et al.*, 2013) ที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในระยะยาวได้

การใช้เส้นใยมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกันจึงอาจเป็นการใช้คุณสมบัติเด่นของเส้นใยแต่ละชนิดเพื่อชดเชยจุดอ่อนของเส้นใยอีกชนิดหนึ่งทำให้สามารถพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดี่ยว เปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเส้นใยสองชนิดและคอนกรีตธรรมดา ในอัตราส่วนผสมต่างๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลคุณสมบัติทางกลที่สำคัญได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด โมดูลัสการแตกร้าวคุณสมบัติด้านความเหนียว การหดตัว ประสิทธิภาพของการใช้เส้นใยต่างชนิดร่วมกันและเพื่อการออกแบบใช้งานคอนกรีตอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากเรื่องกำลังของคอนกรีตแล้ว สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงอีกอย่างหนึ่งคือความคงทนของคอนกรีต เพื่อให้ใช้งานคอนกรีตอย่างคุ้มค่า ดังนั้นจุดประสงค์อีกอย่างหนึ่งคือการศึกษาความทนทานต่อคลอไรด์ในการซึมผ่านด้วย เนื่องจากคุณสมบัติดังกล่าวมี

ผลกระทบต่อพฤติกรรมในระยะยาวของโครงสร้างคอนกรีตส่วนใหญ่ในสภาพแวดล้อมทะเลซึ่ง  
เป็นปัญหาสำคัญของประเทศไทยที่มีชายฝั่งทะเลยาวกว่า 3,000 กิโลเมตร (สำนักงานกองทุน  
สนับสนุนการวิจัย, 2551)



## วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกล การหดตัวและความคงทนในด้านการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดี่ยว เปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเส้นใยสองชนิด และคอนกรีตธรรมดา

### ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดี่ยว คอนกรีตผสมเส้นใยสองชนิด และคอนกรีตธรรมดา ในด้านการรับแรงอัด แรงดัด และความเหนียว (Toughness)
2. เส้นใยที่ใช้ศึกษาคือ เส้นใยเส้นใยเหล็ก เส้นใยPVA นำมาใช้แบบเดี่ยวและแบบใช้ร่วมกัน โดยผันแปรปริมาณของเส้นใยระหว่างร้อยละ 0.5-1.0 โดยปริมาตร
3. ศึกษาการหดตัวพลาสติกของคอนกรีตสด (Plastic shrinkage) โดยการประเมินจาการรอยแตกร้าวและการขยายภาพผ่านเลนส์และศึกษาการหดตัวทั้งแบบอิสระของคอนกรีตแบบแห้ง (Free drying shrinkage)
4. ศึกษาคุณสมบัติความคงทน เฉพาะความทนทานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดี่ยว และคอนกรีตผสมเส้นใยสองชนิด โดยใช้วิธีการแช่ขัง (Ponding Penetration Test)

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อให้ข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดี่ยว เปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเส้นใยสองชนิดและคอนกรีตธรรมดา ในด้านกำลัง ความเหนียว การหดตัวและความคงทนในด้านการซึมผ่านคลอไรด์ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการเลือกใช้เส้นใยในงานอุตสาหกรรมก่อสร้าง

## การตรวจเอกสาร

### ปัญหาและข้อจำกัดของคอนกรีต

คอนกรีตมีความสามารถในการรับกำลังแรงอัดสูงแต่รับกำลังแรงดึงได้ต่ำ จึงทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้งาน และคอนกรีตเป็นวัสดุประกอบ ระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ จึงมีพื้นที่รอยต่อระหว่างวัสดุหรือ Interfacial Transition Zone (ITZ) จำนวนมาก ซึ่งเป็นจุดอ่อนของเนื้อคอนกรีต เนื่องจากมีความพรุนสูงมีรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro Crack) ที่ขยายต่อไปในแมตริกซ์ได้ และการมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวต่ำ (Interfacial Bond) (Zimbelmann, 1985), (Vladimír *et al.*, 2013)

นอกจากบริเวณรอยต่อ ITZ ซึ่งเป็นจุดอ่อนแล้ว เมื่อคอนกรีตยังอยู่ในสภาพพลาสติก อาจเกิดการหดตัวแบบพลาสติกได้โดยอาจเกิดจากการยัดรีงระหว่างระหว่างเนื้อคอนกรีตกับเหล็กเสริมหรือกับไม้แบบการที่คอนกรีตสูญเสียไปสู่สภาพแวดล้อมในช่วงนี้ มีผลต่อการหดตัวและการแตกร้าวเนื่องจากการยัดรีง นอกจากนั้นยังมีการหดตัวของคอนกรีตแบบแห้งที่เกิดขึ้น เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว และอยู่ในสภาพใช้งานโดยการสูญเสียไปสู่สภาพแวดล้อม ทำให้เกิดการหดตัวและการยัดรีงในโครงสร้าง ทำให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็กได้เช่นกัน และรอยร้าวเหล่านี้หากมีการขยายเพิ่มในระยะยาวก็อาจทำให้คอนกรีตสูญเสียความเป็นเนื้อเดียวกัน (Li and Shuguang, 2001)

เมื่อพิจารณาถึงรอยร้าวขนาดเล็กข้างต้น หากโครงสร้างคอนกรีตได้รับแรงกระทำจากภายนอกจะทำให้รอยร้าวเล็กๆ เหล่านั้นเชื่อมต่อกันและขยายใหญ่ขึ้นทำให้คอนกรีตสูญเสียกำลัง (Hansen, 1968); (Banthia and Nandakumar, 2003) รอยร้าวขนาดเล็กภายในคอนกรีตหรือที่พัฒนาขนาดใหญ่ขึ้นในภายหลัง ทำให้สารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ง่ายขึ้น และอาจทำให้คอนกรีตเสื่อมสภาพเร็วขึ้น นอกจากนั้นยังอาจมีผลให้ความสามารถในการปกป้องความเสียหายของเหล็กเสริมจากสภาวะแวดล้อมเสี่ยงลดลง เมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิมในระดับรุนแรง จะขยายตัวส่งผลให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย เป็นเหตุให้โครงสร้างเสียหายและมีอายุการใช้งานลดลง (Abdullah, 2001)

## คุณสมบัติของเส้นใย

คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใยจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเส้นใยและความเข้ากันได้ของเส้นใยกับเนื้อคอนกรีต ปัจจัยและคุณสมบัติหลักๆ ของเส้นใยที่ต้องนำมาพิจารณาคือ ชนิดของเส้นใย เส้นใยบางประเภทสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำหรือซีเมนต์ (Singh and Sarita, 2001) ทำให้เกิดพันธะเคมีช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัส รูปร่าง เส้นใยที่มีการโค้งงอที่ปลายหรือบิดเป็นเกลียว (ACI Committee, 2002) และมีความยาวมากช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวเชิงกลได้ แต่ถ้าเส้นใยยาวมากเกินไปและมีเส้นผ่านศูนย์กลาง จะทำให้เส้นใยพันกัน กระจุกตัวเป็นก้อนใช้การได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ โดยค่าความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย (Aspect Ratio) ที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตผสมเส้นใยมีค่าประมาณ 20-100 (ACI Committee, 2002) แต่ถ้าเส้นใยสั้นเกินไปจะทำให้มีกำลังยึดเหนี่ยวน้อย เส้นใยจะหลุดจากเนื้อคอนกรีตอย่างรวดเร็ว ทำให้คอนกรีตผสมเส้นใยมีความเปราะถึงแม้ว่ากำลังของเส้นใยจะสูงก็ตาม กำลังรับแรงดึงของเส้นใย ก็ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใยเช่นกัน (Bensaid, 2012) นอกจากนี้ปริมาณของเส้นใยที่ใช้ผสมก็มีความสำคัญ ถ้าเส้นใยมีปริมาณน้อยเกินไปก็จะไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการเพิ่มกำลังรับแรงดึงและควบคุมรอยแตกร้าว แต่หากใส่เส้นใยมากเกินไปก็จะทำงานยาก ทำให้คอนกรีตสูญเสียความสามารถในการทำงานและอาจทำให้เกิดโพรงในคอนกรีต (Laetitia, 2010) รวมทั้งทำให้ค่าก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้น

เส้นใยที่มีการนำมาผสมในคอนกรีตสามารถแบ่งได้ 4 ประเภทคือ เส้นใยเหล็ก (Steel fiber) มีหลายขนาดและรูปร่าง ทั้งแบบตรงธรรมดา แบบงอปลายทั้งสองข้าง แบบบิดเป็นเกลียว ทั้งนี้เพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยกับคอนกรีต เส้นใยแก้ว (Glass fiber) คอนกรีตผสมเส้นใยแก้วสามารถรับกำลังดึงได้สูง แต่มักมีปัญหาเกี่ยวกับอัลคาไลน์ เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic fiber) ผลิตจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและสิ่งทอ ที่นำมาใช้งานในคอนกรีต ได้แก่ คาร์บอน ไนลอน โพลีเอสเตอร์ โพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE) โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP) โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol, PVA) อะคริลิก อะรามิด เป็นต้น และเส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber) ซึ่งมีหลายชนิดได้แก่ เส้นใยป่าน เส้นใยมะพร้าว ชานอ้อย ไม้ไผ่ ขนสัตว์ เป็นต้น การใช้งานเส้นใยธรรมชาติในระยะยาวอาจมีปัญหาต่อความคงทนของคอนกรีตได้ (ACI Committee, 2002) โดยคุณสมบัติของเส้นใยชนิดต่างๆ สรุปไว้ดังตารางผนวกที่ 6

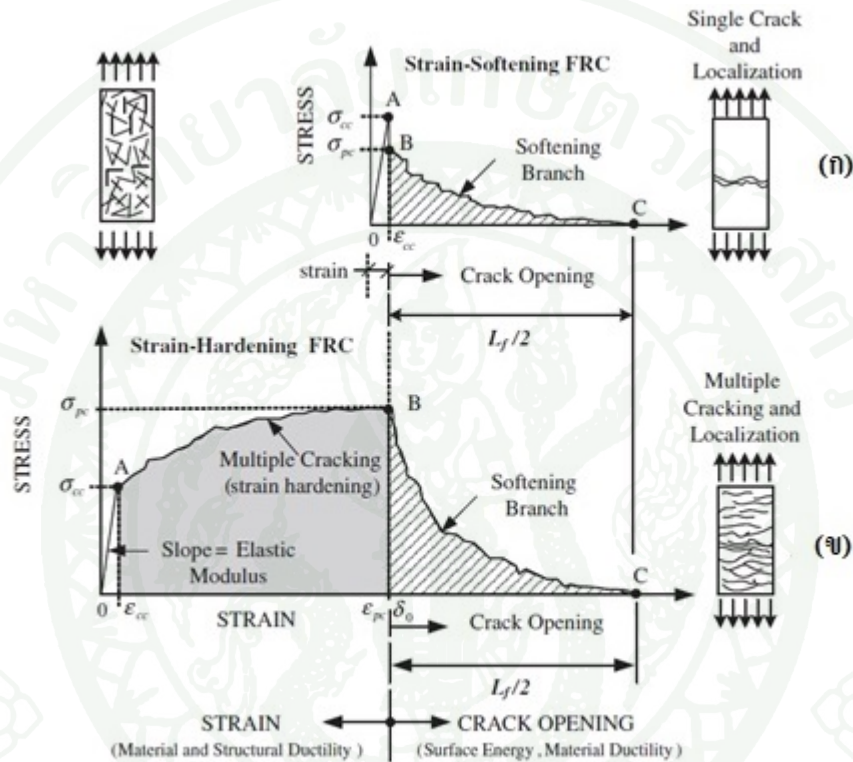
เส้นใยเหล็กมีจุดเด่นในด้านการเพิ่มกับกำลังเชิงกลและความเหนียวให้กับคอนกรีต (Seong *et al.*, 2013) ส่วนเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์มีจุดเด่นในด้านการช่วยลดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวทั้งแบบแห้งและแบบพลาสติก (Alexandra *et al.*, 2009) การนำคุณสมบัติเด่นของทั้งสองชนิดเส้นใยมาใช้ร่วมกันจึงเป็นที่มาของการวิจัยนี้ โดยเลือกใช้เส้นใยเหล็กร่วมกับเส้นใย PVA เนื่องจากมีเส้นใย PVA มีกำลังสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ชนิดอื่น มีคุณสมบัติเป็น hydrophilic ทำให้เกิดพันธะเคมีบริเวณ ITZ ช่วยให้บริเวณนี้มีความทึบแน่นมากขึ้น (Singh and Sarita, 2001) ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีตทั้งในด้านกำลังและลดการหดตัวได้ดียิ่งขึ้น (Etuo *et al.*, 2008)

### คอนกรีตผสมเส้นใย

คอนกรีตผสมเส้นใยเป็นคอนกรีตที่ผสมเส้นใยในลักษณะเส้นใยสั้นๆ ไม่ต่อเนื่อง มีการกระจายตัวอยู่ทั่วไปในทิศทางที่ไม่แน่นอนในเนื้อคอนกรีต โดยเมื่อคอนกรีตได้รับแรงกระทำและเกิดการแตกร้าว จะมีการถ่ายเทแรงไปยังเส้นใยผ่านแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัส ระหว่างซีเมนต์เพสต์กับเส้นใย เส้นใยก็จะรับแรงได้อย่างเต็มที่ ซึ่งจะทำการแตกร้าวหยุดลงหรือไม่ขยายต่อหรือขยายรอยร้าวช้าลง (Jacek, 2006) แต่หากแรงกระทำภายนอกมีค่าสูงกว่ากำลังเส้นใยก็จะทำให้เส้นใยขาด โดยมักมีการวัดค่าประสิทธิภาพของเส้นใยด้วยค่าความดัดชันความเหนียว (Toughness Index) ซึ่งค่าจะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยและปัจจัยอื่นๆ (Banthia and Sappakittipakorn, 2007) แต่หากแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัสมีค่าต่ำ ทำให้เส้นใยไม่ช่วยรับแรงอย่างเต็มที่ ซึ่งส่งผลให้ค่ากำลังต่ำ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการออกแบบรูปร่างและผิวสัมผัสของเส้นใยบางชนิดเช่น เหล็ก เป็นลักษณะต่างๆ กันตามที่ต้องการเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์และเส้นใย ซึ่งจะทำให้คอนกรีตมีความเหนียวขึ้นหรือดูดซับพลังงานได้ดีขึ้น (Bentur and Mindess, 1990); (ACI Committee, 2002)

การผสมเส้นใยในคอนกรีต มีวัตถุประสงค์ให้เส้นใยทำหน้าที่ยึดรั้งรอยแตกร้าวไม่ให้ขยายความยาวโดยง่าย หรือเส้นใยทำหน้าที่เป็น Crack Arrestor (Jacek, 2006) ทำให้รอยร้าวนั้นหยุดลง ทั้งนี้ลักษณะและจำนวนของรอยแตกร้าวมีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงและความเสียหายของคอนกรีต ถ้าปริมาณเส้นใยน้อยหรือแรงยึดเหนี่ยวไม่สูงพอ กำลังรับแรงดึงหลังจากคอนกรีตเกิดการแตกร้าวต่ำกว่ากำลังรับแรงดึงที่จุดแตกร้าวทำให้คอนกรีตมีลักษณะเป็น Strain-Softening FRC (Seung *et al.*, 2012) ซึ่งมักเกิดรอยร้าวแบบแนวเดียวดังแสดงในภาพที่ 1 (ก) และทำให้คอนกรีตเสียกำลังหลังจากเกิดรอยร้าวทันที แต่หากปริมาณเส้นใยมากพอและมีกำลังยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตสูง

เส้นใยจะช่วยยึดรั้งและกระจายรอยแตกร้าว ช่วยลดความต่อเนื่องของรอยแตกร้าว นำไปสู่การเกิดของรอยร้าวใหม่ซึ่งต้องใช้พลังงานมากขึ้น เป็นผลให้คอนกรีตรับกำลังดึงได้สูงขึ้นกำลังรับแรงดึงหลังจากการแตกร้าวได้สูงกว่ากำลังรับแรงดึงที่จุดแตกร้าวมีคุณสมบัติเป็น Strain-Hardening FRC (Seung *et al.*, 2012) ดังเช่นในภาพที่ 1 (ข)



ภาพที่ 1 พฤติกรรม (ก)Strain-Hardening และ(ข)Strain-Softening ของคอนกรีตผสมเส้นใย

ที่มา: Seung Hun Park (2012)

เส้นใยที่นิยมใช้ในการผสมมีหลายชนิดดังที่กล่าวข้างต้น เส้นใยสั้นๆ เหล่านี้ ไม่ต่อเนื่องกัน นำมาผสมในคอนกรีต โดยมีสมมติฐานว่าเส้นใยเหล่านี้กระจายทั่วในเนื้อคอนกรีตอย่างสม่ำเสมอ ประสิทธิภาพของคอนกรีตผสมเส้นใยจะขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของเส้นใยและการยึดเหนี่ยวของเส้นใยกับคอนกรีต ดังนั้น ชนิด ขนาด รูปร่าง กำลังรับแรงของเส้นใย ส่งผลต่อกำลังและพฤติกรรมการเสียหายของคอนกรีตผสมเส้นใยโดยตรง แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสสูงช่วยให้กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเพิ่มขึ้น (Nicola *et al.*, 2011) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวสูงกว่ากำลังรับแรง

ดึงของเส้นใยจะทำให้เส้นใยขาด ส่งผลให้คอนกรีตผสมเส้นใยมีความเปราะซึ่งไม่เป็นผลดี ต่อ พฤติกรรมที่ต้องการ

หากเส้นใยที่ใช้มีปริมาณมากเกินไปและความยาวไม่เหมาะสมจะส่งผลทำให้เส้นใยไม่ กระจายตัวและคอนกรีตสูญเสียความสามารถในการทำงาน ทำให้อัดแน่นได้ยากและส่งผลต่อกำลัง ของคอนกรีตผสมเส้นใย (Laetitia *et al.*, 2010)

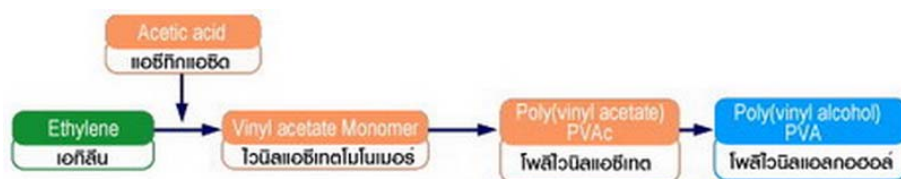
อย่างไรก็ดี จุดประสงค์ของการนำเส้นใยมาผสมในคอนกรีตไม่ได้มีเพื่อเป็นการทดแทน เหล็กเสริม เพียงแต่เส้นใยสามารถใช้เพื่อทดแทน หรือใช้งานในหน้าที่อื่นแทนเหล็กเสริมใน บางส่วนเท่านั้น นอกจากนี้การก่อสร้างที่จะใช้คอนกรีตผสมเส้นใยยังต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่าย เกี่ยวกับวัสดุและขั้นตอนวิธีการก่อสร้างด้วย

### เส้นใยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์

โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA ) เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติพิเศษคือ สามารถย่อยสลายได้โดยวิธีชีวภาพ และติดไฟได้คล้ายกระดาษ นอกจากนี้ยังสามารถละลายในน้ำ ได้ การใช้งานของPVA (Anthony,2003) แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ ลักษณะที่มีคุณสมบัติการ ละลายในน้ำ ใช้เป็นตัวช่วยทำให้ระบบอิมัลชัน และแขวนลอยต่างๆ ขึ้นขึ้น คือใช้เป็น thickening agent และใช้ทำแผ่นฟิล์มเคลือบกระดาษซึ่งมีความใสเหนียว และทนต่อการขีดข่วน

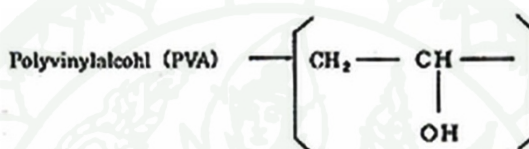
การปรับปรุงการใช้อีกลักษณะหนึ่งคือนำ PVA ไปทำปฏิกิริยาเคมีให้คงสภาพได้ ไม่ สามารถละลายแล้วจึงนำมาใช้งาน ซึ่ง PVA ที่ไม่ละลายในน้ำนี้สามารถดูดน้ำและความชื้นได้เป็น อย่างดี (ประมาณ 30% โดยน้ำหนัก) (Anthony,2003) จึงใช้เป็นเส้นใยแทนฝ้ายทอผ้าได้ ผ้าที่ทำ ด้วยเส้นใยPVAนี้สวมใส่สบาย ซักง่าย ทนทานต่อการสึกหรอ และสามารถงรูปได้เป็นอย่างดี

เส้นใย PVA ประกอบด้วยคาร์บอนไฮโดรเจนและออกซิเจนน้ำและกำมะถันคาร์บอนไดออกไซด์ที่ ประกอบขึ้นระหว่างการเผาไหม้ (Kuraray,2012) โดยการผลิต PVA มีกระบวนการ ดังแสดงในภาพ ที่ 2 และมีโครงสร้างเคมีดังภาพที่ 3



## ภาพที่ 2 กระบวนการผลิต PVA

ที่มา: บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน) (2548)



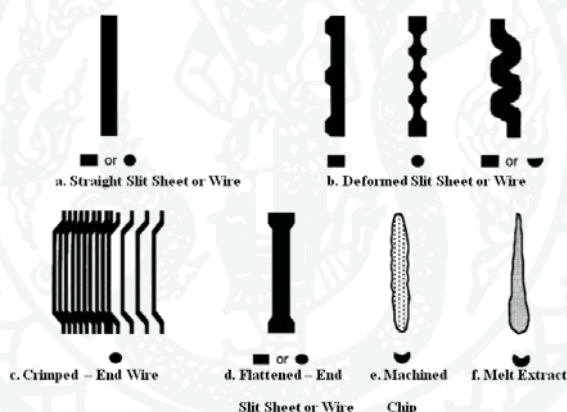
## ภาพที่ 3 โครงสร้างของ PVA

ที่มา: Kuraray America Inc. (2012)

มีการนำเส้นใย PVA มาใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้างตั้งแต่ปี 1980 โดยสืบเนื่องมาจากลักษณะที่ดีของ PVA คือ สามารถรับแรงดึงได้สูง มีความเหนียวและค่าโมดูลัสสูง มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ดูดซึมน้ำได้ดี ทำให้สร้างพันธะที่ผิวสัมผัสกับซีเมนต์เพสต์ที่มีความแข็งแรงสูง ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการบ่ม (Kuraray, 2012) จึงทำให้เส้นใยมีแรงยึดเหนี่ยวกับเนื้อคอนกรีตสูง เมื่อนำมาใช้ร่วมกับคอนกรีตเป็นผลทำให้สามารถลดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวตั้งแต่ยังเป็นคอนกรีตสด เมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัวจะมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำในช่องว่างและอาจเป็นผลต่อแรงดันภายในและเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าวได้ แต่เนื่องจากมีเส้นใยยัดเรียงไว้จึงช่วยลดการแตกร้าวนั้นได้ เมื่อมีแรงกระทำกับคอนกรีตเส้นใยก็จะเริ่มทำงานทันทีทำให้เพิ่มกำลังต้านทานแรงดึงตั้งเริ่มต้นของการรับแรง นอกจากนี้ยังมีความทนทานในการใช้งานในระยะยาว (Horikoshi *et al.*, 2006)

## เส้นใยเหล็ก

เส้นใยเหล็กที่นิยมนำมาใช้มีขนาดเล็กโดยอาจมีรูปร่างและลักษณะแตกต่างกันไปหลายรูปแบบ เช่น เส้นตรง เส้นหยัก เส้นโค้ง บิดเป็นเกลียว หรืออปลาย ดังแสดงในภาพที่ 4 รูปร่างกำลังและความเหนียวของเส้นใยเหล็กและกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับคอนกรีตเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก รูปร่างของเส้นใยมีผลต่อการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวสัมผัส (Interfacial Bond Strength) ของเส้นใยกับเนื้อคอนกรีต โดยทั่วไปเส้นใยเหล็กที่ใช้ในการผสมคอนกรีตมีความยาวไม่เกิน 76 มม. (3 นิ้ว) เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. (0.04 นิ้ว) ค่าความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) มีค่าประมาณ 20-100 และปริมาณที่ใช้ในการผสมคอนกรีตร้อยละ 0.25-2.0 โดยปริมาตร เส้นใยเหล็กมักมีองค์ประกอบเป็นเหล็กคาร์บอนต่ำหรือบางครั้งมีส่วนประกอบของอัลลอยด์ด้วย (ACI Committee, 2002)



ภาพที่ 4 เส้นใยเหล็กแบบต่างๆ

ที่มา: ACI Committee (2002)

## คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใย

คอนกรีตผสมเส้นใย อาจมีคุณสมบัติบางอย่างที่คล้ายคลึงหรือแตกต่างจากคุณสมบัติของคอนกรีตธรรมดา ดังต่อไปนี้

1. ความสามารถในการเทได้ (Workability) การผสมเส้นใยในคอนกรีตมีผลทำให้ความสามารถในการเทคอนกรีตลดลงตามปริมาณการผสมเส้นใยที่เพิ่มขึ้น จากผลการขัดกันทางกลของเส้นใย แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและชนิดของเส้นใย (Laetitia *et al.*, 2010)
2. กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) โดยทั่วไปแล้ว การผสมเส้นใยลงในคอนกรีตมักเป็นไปเพื่อวัตถุประสงค์อื่นไม่ได้มุ่งหมายเพิ่มกำลังรับแรงอัดโดยตรง แต่ในกรณีที่ใช้ปริมาณมากเกินไปมักจะมีผลทำให้กำลังอัดลดลงเนื่องจากปริมาณเส้นใยที่มากเกินไปมีผลทำให้ความสามารถในการเทได้ต่ำ การอัดแน่นจึงทำได้ยาก (Bensaid *et al.*, 2012)
3. กำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) การผสมเส้นใยทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในด้านกำลังรับแรงดึงดีขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากเส้นใยมีความเหนียว และรับแรงดึงได้ดีกว่าคอนกรีต ในสถานะที่มีแรงดึงเกิดขึ้นในคอนกรีตทำให้เกิดการแตกร้าว หน้าที่ของเส้นใยคือยับยั้งหรือชะลอการขยายตัวของรอยแตกร้าว การผสมเส้นใยลงในคอนกรีตจึงมีผลทำให้กำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้น (Olivito and Zuccarello, 2010)
4. กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) การผสมเส้นใยลงในคอนกรีตจะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตสูงขึ้นมาก รูปร่างของเส้นใยที่บิดเกลียวหรือมีการงอปลายทำให้เพิ่มการยึดเกาะกับเนื้อคอนกรีตได้ดี ยิ่งทำให้กำลังรับแรงดัดสูงขึ้น (Seung *et al.*, 2012) ทั้งนี้ความสามารถในการรับแรงดึงและแรงดัดจะดีขึ้นมากน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ เช่น การเรียงตัวของเส้นใย แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสของเส้นใย กำลังของซีเมนต์เพสต์ รวมทั้งชนิดและ รูปร่างของเส้นใย และปริมาณเส้นใยที่ใช้ในการผสม เป็นต้น
5. ความเหนียว (Toughness) และการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption) จุดประสงค์หลักของการผสมเส้นใยลงในคอนกรีตก็คือ การยึดรั้งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของคอนกรีตเมื่อมีแรงกระทำ ซึ่งหากเส้นใยมีค่ากำลังรับแรงและมีแรงยึดเหนี่ยวกับ Matrix ที่เพียงพอจะทำให้สามารถ

ยับยั้งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นหรือทำให้คอนกรีตยังคงรับแรงอยู่ได้ในขณะที่ค่าความเครียดเพิ่มขึ้น (Song *et al.*, 2005)

6. การหดตัว (Shrinkage) การผสมเส้นใยในคอนกรีตช่วยลดรอยร้าวจากการหดตัวทั้งแบบพลาสติกและแบบแห้ง ซึ่งเป็นผลจากแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับเส้นใยทั้งในเชิงกลและเชิงเคมี (Sivakumar and Santhanam, 2007) รวมทั้งเส้นใยมีการหดตัวน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ เมื่อเพิ่มผิวสัมผัสจึงช่วยยั้งทำให้คอนกรีตหดตัวน้อยลง

### ความคงทนด้านการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเส้นใย

การออกแบบใช้งานคอนกรีตอย่างมีประสิทธิภาพต้องคำนึงถึงเรื่องกำลังของคอนกรีต และยังต้องคำนึงถึงความคงทนของคอนกรีตซึ่งเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้ใช้งานคอนกรีตได้อย่างคุ้มค่า ปัญหาการเสื่อมสภาพจากคลอไรด์เป็นปัญหาที่สำคัญ โดยเฉพาะ โครงสร้างที่อยู่ในแวดล้อมทะเล ซึ่งเป็นสภาวะแวดล้อมหนึ่งที่พบมากในประเทศซึ่งมีชายฝั่งทะเลยาวกว่า 3,000 กิโลเมตรอย่างเช่น ประเทศไทย (สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2551) ดังนั้นการนำเส้นใยหลากหลายชนิดมาใช้ร่วมกับคอนกรีตจึงต้องคำนึงถึงปัญหานี้ด้วย ทั้งในด้านของวัสดุเส้นใยและผลกระทบจาก ITZ ต่อพฤติกรรมแทรกซึมของไอออนคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต ซึ่งมีงานวิจัยในต่างประเทศจำนวนมากไม่น้อยที่ให้ความสนใจในหัวข้อนี้

Toutanji *et al.* (1998) ได้ศึกษาการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีน (Propylene; PP) โดยใช้เส้นใย 2 ขนาดคือ ความยาว 12.5 และ 19 มิลลิเมตร อัตราส่วนของเส้นใย 0.1%, 0.3% และ 0.5% ทำการทดสอบโดยวิธี Rapid Chloride Permeability Test และพบว่า คอนกรีตผสมเส้นใยมีปัญหาในเรื่องความสามารถในการเทได้ต่ำ ทำให้การอัดแน่นเป็นไปได้ยาก จึงเกิดความพรุนสูง ทำให้คลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ง่าย ยิ่งเพิ่มปริมาณเส้นใยมากขึ้น การซึมผ่านของคลอไรด์ก็ยิ่งสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันเส้นใยที่มีขนาดยาวกว่าและมีพื้นที่ผิวมากกว่าทำให้เกิดการขัดกันทางกลมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เส้นใยที่สั้นและขนาดใหญ่กว่าทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ลดลงมากขึ้น ดังนั้นคอนกรีตผสมเส้นใยที่มีขนาดยาวเนื้อคอนกรีตมีความพรุนมากขึ้นจึงมีผลกระทบทำให้ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลงมากกว่าทั้งในคอนกรีตธรรมดา

งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเส้นใย นิยมทำการทดสอบด้วยวิธี Rapid Chloride Permeability Test เปรียบเทียบการซึมผ่านของคลอไรด์จากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ซึ่งเส้นใยเหล็กเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าในคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กจึงได้ผลการทดสอบที่อาจคลาดเคลื่อน และไม่ตรงกับความเป็นจริง ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการแช่ขัง (Ponding Penetration Test) แล้วนำหาปริมาณไอออนของคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆ ในสองสถานะคือสถานะอิ่มตัวจากคลอไรด์ตลอดเวลาและสถานะเปียกสลับแห้ง ซึ่งเป็นการจำลองให้ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริงซึ่งยังมีการวิจัยในลักษณะนี้น้อยมาก

### คอนกรีตผสมเส้นใยPVA

ดังที่กล่าวแล้วว่าเส้นใย PVA เป็นเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ที่มีกำลังต่ำแต่มีความยืดหยุ่นสูง จึงมักใช้ในโครงสร้างที่ไม่ต้องรับแรงสูงมาก แต่ต้องการความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือในกรณีของรูปทรงของโครงสร้างที่มีความซับซ้อน ช่วยลดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวทั้งแบบแห้ง (Alexandra *et al.*, 2009) และแบบพลาสติกของคอนกรีต และยังช่วยปรับปรุงความสามารถต้านทานแรงกระแทกของคอนกรีต เนื่องจากเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของต่ำ ซึ่งเป็นผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกได้ดี (Song *et al.*, 2005) (Bo *et al.*, 2010) การกระจายตัวของเส้นใยในคอนกรีตอย่างสม่ำเสมอช่วยลดการเกิดช่องว่างขนาดใหญ่ (Capillary Pores) ซึ่งเป็นผลจากการเคลื่อนตัวของน้ำในคอนกรีตสู่ผิวบนน้อยลงจึงมีผลกระทบต่อลดการซึมของคอนกรีต

Sameer *et al.* (2010) ได้ศึกษาพฤติกรรมการโก่งตัวของคานคอนกรีตผสมเส้นใย PVA ขนาดเล็ก ใช้ตัวอย่างคานคอนกรีตขนาด 10x10x35 ซม. และทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. เพื่อทดสอบกำลังรับแรงคดและแรงอัด ตามลำดับ โดยใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้มวลรวมต่างชนิดกันคือ หินปูน หินแกรนิต หินstaylite ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และสัดส่วนปูน:หิน:ทรายเท่ากับ 1:2:3 และใช้ปริมาณเส้นใยPVA 3% บ่มตัวอย่างไว้ในน้ำ 28 วัน แล้วทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานASTM C 39 ส่วนแรงคดทดสอบโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine แบบวงรอบปิด (Close loop control type) ใช้อัตราการเคลื่อนที่ของหัวกด 0.033 มิลลิเมตรต่ออนาที

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดพบว่าคอนกรีตธรรมดาที่มีพฤติกรรมแบบ strain-softening น้อยมากคือหลังจากรับกำลังสูงสุดแล้วจะเกิดการเสียหายแบบเฉียบพลัน การใส่เส้นใยขนาดเล็กเพิ่มส่งผลกระทบน้อยต่อพฤติกรรมก่อนการแตกร้าวแต่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพหลังจากเกิดรอยร้าวแตกร้าว ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเส้นใยและใช้มวลรวมหินปูนยังสามารถรับแรงได้ต่อไปโดยไม่เสียหายทันทีหลังจากที่รับแรงสูงสุด

จากผลทดสอบกำลังรับแรงดึง ความสัมพันธ์ของstress-strain ของคอนกรีตปกติมีลักษณะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งแรงลดลงเฉียบพลันซึ่งแสดงว่าเริ่มเกิดการแตกร้าว แต่คอนกรีตผสมเส้นใยยังสามารถต้านทานแรงดึงได้ ต่อแสดงว่าเส้นใยทำหน้าที่รับแรงดึงที่เกิดระหว่างรอยแตกร้าว ช่วยให้คอนกรีตผสมเส้นใยมีstrain capacityมากกว่า 0.65% และรับกำลังสูงสุดได้ถึง 3.79 MPa (550 psi) การที่เส้นใย PVA ช่วยชะลอการวิบัติอย่างเฉียบพลัน แสดงให้เห็นว่าเส้นใยมีแรงยึดเหนี่ยวกับผิวสัมผัสสูง

Etuo *et al.* (2008) ได้มีการศึกษาคอนกรีตผสมเส้นใยสองชนิดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ทำชิ้นส่วนสำเร็จรูปของพื้นและหมอนรองรางรถไฟโดยเปรียบเทียบระหว่างเส้นใย PP และเส้นใย PVA และพบว่าคอนกรีตผสมเส้นใย PVA ช่วยปรับปรุงกำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตผสมเส้นใย PP เนื่องจากมีแรงยึดเกาะและมีกำลังรับแรงดึงสูงกว่า ถึงแม้ว่าความสามารถในการเทต่ำกว่าเส้นใย PP เนื่องจากมีการดูดซึมน้ำและความถ่วงจำเพาะสูงกว่าเส้นใย PP คอนกรีตผสมเส้นใย PVA รับกำลังแรงดัดได้สูงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นชิ้นส่วนสำเร็จรูปของพื้นวางบนดินและหมอนรองรางรถไฟทดแทนคอนกรีตเสริมเหล็ก ผลดีจากการที่เส้นใย PVA มีการกระจายตัวทั่วเนื้อคอนกรีตทำให้ออกแบบง่าย เพราะโครงสร้างของหมอนรองรางรถไฟมีการดัดโค้งซับซ้อน จึงไม่ต้องเสียเวลาตัดเหล็กเสริม ทำให้การใช้คอนกรีตผสมเส้นใย PVA แทนการใช้เหล็กเสริมทำให้ประหยัดงบประมาณและเวลาในการก่อสร้าง และเส้นใย PVA ยังมีความทนทานต่อคลอไรด์ ไม่เป็นสนิมจึงมีผลต่อความคงทนระยะยาวอีกด้วย

### คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก

เส้นใยเหล็กเป็นเส้นใยที่มีกำลังรับแรงดึงสูงประมาณ 1,100 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (Bekaert, 2010) จึงมักใช้ในโครงสร้างที่ต้องการการรับกำลังสูง โดยใช้เส้นใยเหล็กเพื่อทดแทนหรือทำงานในหน้าที่อื่นแทนเหล็กเสริมในบางส่วน โดยเส้นใยเหล็กยังช่วยลดอิทธิพลจาก

พฤติกรรม Tension stiffening (Seong *et al.*, 2013) ที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในระยะยาวได้

การใช้เส้นใยเหล็กร่วมกับคอนกรีต มักมีผลให้ความสามารถในการเทได้ต่ำลงและอาจเกิดปัญหาต่อการอัดแน่นซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเส้นใยเหล็กช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดึง แรงคัดและแรงเฉือนให้แก่คอนกรีต ช่วยยึดรั้งคอนกรีตหลังจากเกิดการแตกร้าว ทำให้สามารถปรับปรุงพฤติกรรมการเสียหายไม่ให้เกิดความเสียหายอย่างเฉียบพลัน (Bensaid *et al.*, 2012) และเพิ่มความเหนียวหลังการเกิดรอยแตกร้าวโดยเป็นผลการยึดเกาะที่ดีของเส้นใยกับเนื้อคอนกรีต

ความยาววิกฤตของเส้นใยเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของคอนกรีต เส้นใยขนาดสั้นจะกระจายตัวได้สม่ำเสมอ และไม่เกาะพันกันเป็นกลุ่มทำให้รับแรงดึงได้ดีกว่าเส้นใยยาว (Olivito and Zuccarello, 2010) เมื่อนำเส้นใยเหล็กที่มีขนาดสั้นใช้ร่วมกับคอนกรีตในการเทคอนกรีตเสา มีรายงานว่าผลช่วยปรับปรุงพฤติกรรมการเสียหายแบบ โกงเดาะ (Buckling) และการเสียหายที่เกิดจากคอนกรีตหุ้ม แตกร่อน (Cover Spalling) ได้ด้วย (Serkan *et al.*, 2012)

การที่เส้นใยเหล็กกระจายตัวไปทั่วเนื้อคอนกรีตจึงมักทำให้เส้นใยบริเวณผิวหน้าอาจมีระยะหุ้มคอนกรีตอาจไม่เพียงพอและเกิดสนิมบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตได้ง่าย สนิมที่เกิดขึ้นไม่ได้มีผลต่อกำลังของคอนกรีตมากนัก แต่อาจมีผลต่อความสวยงามในด้านสถาปัตยกรรม (Balouch *et al.*, 2010) อย่างไรก็ตาม เส้นใยเหล็กมีโอกาสเกิดสนิมน้อยกว่าเหล็กเสริมทั่วไป เนื่องจากเส้นใยเหล็กส่วนใหญ่นิยมทำมาจากเหล็กไร้สนิม นอกเสียจากว่าคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กอยู่ในสถานะแวดล้อมที่รุนแรงมากเช่น อยู่ใกล้หรือในทะเล รอยแตกร้าวจะเป็นเหตุให้เส้นใยเกิดสนิมอย่างรุนแรง และส่งผลทำให้คุณภาพคอนกรีตเสียหาย (Jean and Balouch, 2005) นอกจากนี้การเกิดสนิมในเส้นใยสั้นๆมักสิ้นสุดในเส้นใยที่เกิดไม่มีการต่อเนื่องไปยังเส้นใยอื่นซึ่งต่างไปจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม ซึ่งสามารถลามต่อเนื่องได้ (Kosa and Naaman, 1990); (Homayoon *et al.*, 2013)

## คอนกรีตผสมเส้นใยหลายชนิด

คอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดียวมีผลต่อการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตได้ดีในบางกรณี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเส้นใยนั้นๆ และอาจทำให้มีข้อจำกัดต่อการนำไปใช้งานบางอย่างหรืออาจไม่สะดวกในการทำงานบางประเภท จึงได้มีการนำเส้นใยหลายชนิดมาใช้ร่วมกันเพื่อดึงคุณสมบัติเด่นของเส้นใยแต่ละชนิด เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น และเหมาะสมกับวิธีการทำงานมากขึ้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 1. การลดการแตกร้าวเนื่องจากหดตัว

ประสิทธิภาพของคอนกรีตผสมเส้นใยขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบ ทั้งชนิด ขนาด รูปร่าง การผสมเส้นใยช่วยลดการขยายตัวของรอยแตกร้าวในคอนกรีตได้ เส้นใยที่มีลักษณะโค้งหักจะช่วยยับยั้งการขยายตัวของรอยแตกร้าว (Crack growth) ได้ดีกว่าเส้นใยที่มีลักษณะเส้นตรงราบ เนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสมากกว่า ทำให้มีความเหนียวเพิ่มขึ้นและต้องใช้เวลาใช้งานมากขึ้น เมื่อคอนกรีตเกิดรอยร้าวแรก จึงไม่เกิดการเสียหายอย่างกะทันหันในช่วงที่เริ่มเกิดการแตกร้าว นักวิจัยพบว่า การเพิ่มเส้นใย PP ขนาดเล็กใช้ร่วมกับเส้นใยเหล็ก สามารถช่วยชะลอการขยายขนาดของรอยร้าวให้หลังจากการแตกร้าวได้ดี (Banthia and Nandakumar, 2003)

Sivakumar *et al.* (2007) ได้ศึกษาพฤติกรรมคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กและเส้นใยโพลีเอสเตอร์ นำมาใช้ร่วมกัน โดยเส้นใยโพลีเอสเตอร์ได้แก่ เส้นใย PP เส้นใยแก้ว และเส้นใยโพลีเอสเตอร์ ในการช่วยลดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก โดยแปรผันอัตราส่วนของเส้นใยระหว่างร้อยละ 0.5-1.0 โดยปริมาตร ทดสอบโดยใช้ตัวอย่างที่หล่อขึ้น โดยใช้แบบหล่อขนาด 500x250x75 มิลลิเมตร มีสันเพื่อลดความหนาบริเวณกึ่งกลางแบบหล่อ เมื่อเทคอนกรีตเสร็จนำไปบ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิ  $35 \pm 1$  องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ  $40 \pm 1$  ใช้ควบคุมความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้ววัดขนาดรอยแตกร้าวที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าและพบว่าคอนกรีตผสมเส้นใยสามารถช่วยลดรอยร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติกได้ถึงร้อยละ 50-99 เมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา การนำเส้นใยที่ไม่ใช่โพลีเอสเตอร์ใช้ร่วมกับเส้นใยเหล็กช่วยลดการแตกร้าวได้ดีกว่าผสมเส้นใยเหล็กเพียงอย่างเดียว ประสิทธิภาพของเส้นใยในการช่วยลดรอยร้าวได้ดีคือ เส้นใยโพลีเอสเตอร์ เส้นใย PP และเส้นใยแก้ว ตามลำดับ โดยการใช้เส้นใยเหล็กร่วมกับเส้นใยโพลีเอสเตอร์ และการใช้เส้นใยเหล็กร่วมกับเส้นใย PP เมื่อใช้ในปริมาณเท่ากันช่วยลดการร้าว

จากการหดตัวได้ใกล้เคียงกัน ในขณะที่เดียวกันการใช้เส้นใยเหล็กร่วมกับเส้นใยแก้วในช่วงปริมาณน้อยๆ จะช่วยลดการหดตัวได้น้อยกว่าเส้นใยโพลีเอสเตอร์ และเส้นใย PP แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วมากขึ้นจะช่วยลดการหดตัวเพิ่มขึ้นจนใกล้เคียงกับเส้นใยโพลีเอสเตอร์ และเส้นใย PP แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณของเส้นใยที่ไม่ใช่โลหะมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมของรอยร้าว แต่ในทางตรงกันข้ามก็มีผลกระทบต่อความสามารถในการเทได้ และเสนอให้ปริมาณเส้นใยเส้นใยที่ไม่ใช่โลหะในระดับร้อยละ 0.25 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการทำงาน

Wei Sun *et al.* (2001) ได้ศึกษาผลกระทบการหดตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยทั้งแบบชนิดเดียวและหลายชนิดร่วมกัน โดยใช้เส้นใยเหล็กยาว 5, 20, 25 มม. เส้นใย PVA และเส้นใย PP แปรผันอัตราส่วนตั้งแต่ร้อยละ 0.5-2 โดยทำการทดสอบการหดตัวแบบแห้งอิสระตามมาตรฐาน ASTM C 490 และพบว่า การหดตัวของคอนกรีตเกิดขึ้นจากการสูญเสียน้ำ มีผลทำให้เกิดช่องว่างและรอยแตกร้าวในเนื้อคอนกรีต การเลือกใช้เส้นใยก็มีส่วนต่อการช่วยลดการหดตัวของคอนกรีต การใช้เส้นใยเหล็กต่างขนาดร่วมกันช่วยลดการหดตัวได้ร้อยละ 10-34 ของการผสมเส้นใยเหล็กขนาดใหญ่เพียงขนาดเดียว และร้อยละ 45-65 ของคอนกรีตธรรมดา ตามลำดับ สำหรับการใส่เส้นใยเหล็กกับเส้นใย PVA ร่วมกันหรือการใช้เส้นใยเหล็ก เส้นใย PVA และเส้นใย PP ร่วมกันสามารถลดการหดตัวได้ร้อยละ 39-49 ของการผสมเส้นใยเหล็กขนาดใหญ่เพียงขนาดเดียว แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตผสมเส้นใยหลายชนิดมีประสิทธิภาพต่อการต้านทานการหดตัวได้ดีกว่าคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดียวอย่างเห็นได้ชัด

## 2. ความชื้นได้

ในด้านความชื้นได้ของคอนกรีตนั้น Wei Sun *et al.* (2001) ได้ศึกษาผลกระทบของเส้นใยต่อการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเส้นใยทั้งแบบชนิดเดียวและหลายชนิดร่วมกัน โดยใช้เส้นใยเหล็กยาว 5, 20, 25 มม. เส้นใย PVA และเส้นใย PP แปรผันอัตราส่วนตั้งแต่ร้อยละ 0.5-2.0 โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูง 180 มิลลิเมตรและ 150 มิลลิเมตร ตามลำดับ บ่มคอนกรีตไว้ตามมาตรฐาน 28 วัน จากนั้นตัวอย่างจะได้รับแรงดันน้ำ 1.8 MPa เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นผ่าตัวอย่างคอนกรีต แล้ววัดการซึมผ่านน้ำ และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านจากสมการที่ 1

$$S_k = mD_m^2/2TH \quad (1)$$

โดยที่  $D_m$  = ความลึกเฉลี่ยที่น้ำซึมผ่าน (ซม.)  
 $H$  = แรงดันน้ำ แสดงเป็นความลึก (ซม.)  
 $T$  = ระยะเวลาที่ให้แรงดันน้ำ (ซม.)  
 $m$  = เปอร์เซ็นต์ช่องว่างในคอนกรีต โดยทั่วไป 0.03

นักวิจัยพบว่า เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของเส้นใยที่เท่ากัน คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กหลายขนาดมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่าการใช้เส้นใยเหล็กขนาดเดียว ร้อยละ 16-56 และต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา ร้อยละ 42-70 คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กสามขนาดลดการซึมผ่านของน้ำได้ดีกว่าการใช้เส้นใยสองขนาด หรือขนาดเดียว การผสมเส้นใยสองหรือสามชนิด (เส้นใยเหล็ก, เส้นใย PP และเส้นใย PVA) ลดการซึมผ่านของน้ำได้ ร้อยละ 56-70 เมื่อเทียบกับคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กขนาดใหญ่ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเปลี่ยนแปลงสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบจากคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยสามชนิด ลดลงถึงร้อยละ 92 แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำขึ้นอยู่กับปริมาณ ชนิดและขนาดของเส้นใยที่จะทำให้คอนกรีตที่บ่มแน่นขึ้น

### 3. การพัฒนาคุณสมบัติเชิงกล

วัตถุประสงค์หลักของการนำเส้นใยผสมคอนกรีต เพื่อปรับปรุงกำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงดัดซึ่งเป็นจุดอ่อนของคอนกรีต คุณสมบัติในการรับแรงของแต่ละเส้นใยแตกต่างกันออกไป ดังนั้นการนำเส้นใยต่างชนิดมาใช้ร่วมกันจึงเป็นการนำคุณสมบัติเด่นของแต่ละเส้นใยมาช่วยปรับปรุงพฤติกรรมในการรับแรงของคอนกรีต

Shaikh *et al.* (2007) ได้ศึกษาคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กร่วมกับเส้นใย PVA และเส้นใย PE ทดสอบกำลังรับแรงดัดแบบกดสี่จุด โดยใช้การควบคุมการโก่งตัว ด้วยอัตราการกด 0.25 มิลลิเมตรต่อนาที และบันทึกค่าโก่งตัวที่กลางคานเทียบความสัมพันธ์กับความเค้นดัด

ผลการทดสอบพบว่า การใช้เส้นใยเหล็กและเส้นใย PVA หรือเส้นใย PE ร่วมกัน ทำให้กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้เส้นใย PVA หรือเส้นใย PE เพียงชนิดเดียว และสามารถโก่งตัวได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับผสมเส้นใยเหล็กเพียงอย่างเดียวเช่นกัน และจากค่าที่ได้พบว่า

คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กและเส้นใย PVA ร่วมกัน สามารถรับกำลังแรงตัดได้สูงกว่าคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กร่วมกับเส้นใย PE เนื่องจากเส้นใย PVA มีแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวมากกว่าเส้นใย PE ส่งผลให้รับกำลังแรงตัดได้สูงกว่า แต่เส้นใย PVA มีกำลังต่ำกว่าเส้นใย PE เมื่อรับแรงตัดสูงสุดเส้นใยเกิดขาดและทำให้คอนกรีตวิบัติอย่างรวดเร็ว จึงทำให้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเส้นใย PVA ด้านทานการโก่งตัวต่ำกว่าการผสมเส้นใย PE

งานของ Seung *et al.* (2012) ศึกษาอิทธิพลของความยาวและรูปร่างของเส้นใยเหล็กที่มีผลต่อพฤติกรรม strain hardening ลักษณะและจำนวนรอยแตกร้าวโดยใช้เส้นใยเหล็กขนาดใหญ่ (Macro Steel Fiber) ที่มีความแตกต่างกันคือ แบบยาวเรียบ แบบสั้นงอปลาย แบบยาวงอปลาย และแบบเกลียว เป็นเส้นใยหลักแล้วเพิ่มเส้นใยเหล็กขนาดเล็ก (Micro Steel Fiber) แบบเรียบเป็นเส้นใยรองใช้ร่วมกับเส้นใยทั้งสี่ชนิด โดยใช้เส้นใยหลักร้อยละ 1.0% และเส้นใยรองร้อยละ 1.5% และทำการทดสอบแรงดึงแบบตรง โดยขึ้นตัวอย่างใช้วิธีการบ่มแรงด้วยอุณหภูมิสูงโดยมีรายละเอียดคือ เมื่อเทคอนกรีตเสร็จคลุมด้วยพลาสติกแล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง 48 ชั่วโมง ก่อนที่จะถอดออกจากแบบแล้วนำไปบ่มน้ำที่มีอุณหภูมิสูง  $90 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน แล้วให้อยู่ในสถานะแห้งในอากาศ 21 วัน แล้วทำพ่น polyurethane 2-3 ชั้น ทิ้งไว้ให้แห้งก่อนทดสอบแรงดึง เพื่อให้เห็นรอยร้าวอย่างชัดเจน

ผลการศึกษา แสดงว่าการนำเส้นใยขนาดเล็กและขนาดใหญ่มาใช้ร่วมกัน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงดึงของคอนกรีตและลดจำนวนรอยแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro Crack) ได้ดี โดยขึ้นอยู่กับปริมาณของเส้นใยขนาดเล็กและการกระจายตัวที่ดี รูปร่างของเส้นใยเหล็กขนาดใหญ่ยังส่งผลกระทบต่อการพัฒนากำลังรับแรงดึงและช่วยลดขนาดของรอยแตกร้าวเช่นกัน เนื่องจากรูปร่างของเส้นใยจะช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยกับคอนกรีต เส้นใยเหล็กที่มีลักษณะบิดเป็นเกลียว และเส้นใยเหล็กที่มีการงอปลาย มีประสิทธิภาพในการช่วยเพิ่มพลังงานหลังการเกิดรอยร้าวและลดการความต่อเนื่องของรอยร้าว ส่วนเส้นใยเหล็กที่มีขนาดยาว จะมีส่วนช่วยปรับปรุงกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตน้อยมาก

#### 4. การลดต้นทุนในการก่อสร้าง

การเลือกใช้ชนิด ขนาด หรือรูปร่างของเส้นใยที่นำมาใช้ร่วมกันมีส่วนสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีต นอกจากนั้นการผสมเส้นใยในคอนกรีตยังเป็นการเพิ่มต้นทุน จึงต้องมีการพิจารณาค่าใช้จ่ายอย่างรอบคอบ

Banthia *et al.* (2007) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพความเหนียวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กขนาดเดียวและสองขนาดร่วมกันแปรผันปริมาณเส้นใยตั้งแต่ร้อยละ 0.5-1 แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงดัด พบว่า การนำเส้นใยเหล็กขนาดเล็กที่มีราคาสูงกว่าและขนาดใหญ่ที่มีราคาถูกและหาง่ายกว่ามาใช้ร่วมกัน ทำให้กำลังรับแรงดัด การ โกงตัว และความเหนียวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้เส้นใยเหล็กขนาดใหญ่เพียงอย่างเดียว ถึงแม้จะมีคุณสมบัติที่เพิ่มขึ้นจะน้อยกว่าการใช้เส้นใยเหล็กขนาดเล็กอย่างเดียว

การเลือกใช้เส้นใยควรเลือกให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน กำลังที่ต้องการ และคำนึงถึงงบประมาณด้วย ดังนั้นการกำหนดขอบเขตที่ยอมรับได้อาจใช้เป็นแนวทางกำหนดทางเลือกที่ประหยัดงบประมาณ

#### การใช้งานคอนกรีตผสมเส้นใย

คอนกรีตผสมเส้นใยอาจนำไปใช้ในงานพื้นที่มีบริเวณกว้างๆได้ ระบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป (RC Slab) มีราคาต่ำกว่าพื้นคอนกรีตเสริมเส้นใย (SFRC Slab) แต่ข้อด้อยของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป คือ คุณลักษณะของระบบที่จำเป็นต้องมีการตัดร่องกันแตกร้าว ซึ่งมักจะเป็นปัญหาต่อการใช้งานและทำให้ผู้ใช้งานอาคารจำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษามากขึ้น อีกทั้งยังทำให้ประสิทธิภาพในการใช้งานอาคารลดลงด้วย (Twintec, 2014)

การลดจำนวนรอยตัดและรอยต่อของพื้นอาคารจะช่วยให้การใช้งานอาคารมีประสิทธิภาพมากขึ้นและช่วยลดความเสียหายบริเวณขอบและมุมของรอยต่อจากแรงกระแทกซึ่งเกิดจากการวิ่งผ่านของเครื่องจักร ระบบพื้นคอนกรีตเสริมเส้นใยสามารถทำงานอย่างรวดเร็วและประหยัดเวลา ตัวอย่างเช่นในปี 2556 ศูนย์กระจายสินค้าเทสโก้โลตัส จังหวัดขอนแก่น ได้ดำเนินก่อสร้างพื้น

คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ระบบไร้รอยตัด โดยมีพื้นที่รวมทั้งหมด 51,543 ตารางเมตร ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างเพียง 41 วัน (Twintec, 2014)

เส้นใย PVA ยังไม่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศไทยมากนัก เนื่องจากมีราคาสูง แต่ในต่างประเทศมีการใช้เส้นใย PVA มากขึ้น โดยส่วนใหญ่จะนำมาใช้ในงาน Shotcrete ผนังอุโมงค์ ท่อลอด ใช้ในการปรับปรุงและซ่อมแซมโครงสร้างที่มีผนังบางโดยการฉีดพ่น (Alabama Department of Transportation, 2008) วัสดุผงหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์แทนใยหิน พื้นโรงงานอุตสาหกรรม (Horikoshi *et al.*, 2006)

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) มีขีดความสามารถทดสอบไม่ต่ำกว่า 20 ตัน
2. แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 สูง 20 เซนติเมตร
3. แบบหล่อคานคอนกรีต ขนาด 10 x 10 x 35 เซนติเมตร
4. แบบหล่อแผ่นคอนกรีต ขนาด 25 x 25 x 10 เซนติเมตร
5. แบบหล่อคอนกรีตปริซึม ขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 เซนติเมตร
6. เครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความสามารถรับน้ำหนักได้ 15 กิโลกรัมและมีความละเอียด 0.5 กิโลกรัม
7. เครื่องวัดการหดตัวที่มีความละเอียด 0.002 มิลลิเมตร
8. ผสมคอนกรีต ขนาดความจุ 200 ลิตร
9. เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) มีขีดความสามารถทดสอบไม่ต่ำกว่า 20 ตัน
10. แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 สูง 20 เซนติเมตร
11. แบบหล่อคานคอนกรีต ขนาด 10 x 10 x 35 เซนติเมตร
12. แบบหล่อแผ่นคอนกรีต ขนาด 25 x 25 x 10 เซนติเมตร
13. แบบหล่อคอนกรีตปริซึม ขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 เซนติเมตร
14. เครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความสามารถรับน้ำหนักได้ 15 กิโลกรัมและมีความละเอียด 0.5 กิโลกรัม
15. เครื่องวัดการหดตัวที่มีความละเอียด 0.002 มิลลิเมตร
16. ผสมคอนกรีต ขนาดความจุ 200 ลิตร
17. เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) มีขีดความสามารถทดสอบไม่ต่ำกว่า 20 ตัน
18. แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 สูง 20 เซนติเมตร
19. แบบหล่อคานคอนกรีต ขนาด 10 x 10 x 35 เซนติเมตร
20. แบบหล่อแผ่นคอนกรีต ขนาด 25 x 25 x 10 เซนติเมตร
21. แบบหล่อคอนกรีตปริซึม ขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 เซนติเมตร
22. เครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความสามารถรับน้ำหนักได้ 15 กิโลกรัมและมีความละเอียด 0.5 กิโลกรัม
23. เครื่องวัดการหดตัวที่มีความละเอียด 0.002 มิลลิเมตร

## 24. ผสมคอนกรีต ขนาดความจุ 200 ลิตร

### วัสดุ

1. ปูนซีเมนต์ (Cement) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement: Type I) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 150
2. วัสดุผสม (Aggregate) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 33 สำหรับมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ใช้ทรายแม่น้ำ ลักษณะสีน้ำตาล สำหรับมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ใช้หินปูนย่อย ขนาด 3/8" สีเทาดำ
3. น้ำ (Water) ใช้น้ำประปาสะอาด
4. น้ำยาผสมคอนกรีตใช้ประเภทสารลดน้ำอย่างมาก (Superplasticizer) ยี่ห้อ Sikament type FF เป็นน้ำยาผสมคอนกรีตประเภทเมลามีนซัลไฟเนต ที่ให้คุณสมบัติการลดน้ำในอัตราสูงมากถึง 35% ช่วยเร่งการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นระยะ 16-18 ชั่วโมง คุณสมบัติเทียบเท่ามาตรฐาน ASTM C 494-81 (Type A และ F) มีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาล (Sika, 2008)
5. เส้นใยที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ใช้เส้นใย 2 ชนิด คือ เส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย (Hooked End) ยี่ห้อ Dramix ประเภท RC-65/35-BN ลักษณะดังแสดงในภาพที่ 5(ก) และ เส้นใย Polyvinyl Alcohol (PVA) ประเภท resin bundled ยี่ห้อ Kuraray ประเภท RECS100L มีลักษณะเป็นเส้นเล็กๆ สั้นๆ สีขาว ดังแสดงในภาพที่ 5(ข) โดยคุณสมบัติของเส้นใยชนิดแสดงในตารางที่ 1

### ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเส้นใย

Type of Fiber	Specific Gravity	Length (mm.)	Diameter (mm.)	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )
Steel	7.8	35	0.55	1100
PVA	1.3	12	0.01	1200

ที่มา: Bekaert (2010) และ Kuraray (2012)



ภาพที่ 5 ลักษณะที่ใช้ในการศึกษา (ก) เส้นใยเหล็ก (ข) เส้นใยPVA

## มาตรฐานในการทดสอบ

ในการศึกษานี้ทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐาน ดังต่อไปนี้

1. การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผสม ตามมาตรฐานASTM C 33
  - 1.1 การทดสอบขนาดคละของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน ASTM C 136
  - 1.2 การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึ่มของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐานASTM C 128 และ ASTM C 127 ตามลำดับ
  - 1.3 การทดสอบหน่วยน้ำหนักและช่องว่างระหว่างมวลรวม ตามมาตรฐานASTM C 29
2. การทดสอบค่าการยุบตัว ตามมาตรฐาน ASTM C 143
3. การทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM C 39
4. การทดสอบกำลังรับแรงดัด ตามมาตรฐาน ASTM C 1609
5. การทดสอบการหดตัวแบบแห้งอิสระ ตามมาตรฐาน ASTM C 15
6. การทดสอบการหดตัวแบบพลาสติก โดยการประเมินจากรอยแตกร้าว ตามมาตรฐาน ASTM C 1579
7. การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ โดยวิธีการแช่ขัง Ponding Penetration Test ตามมาตรฐาน ASTM C 1543

### การออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีต

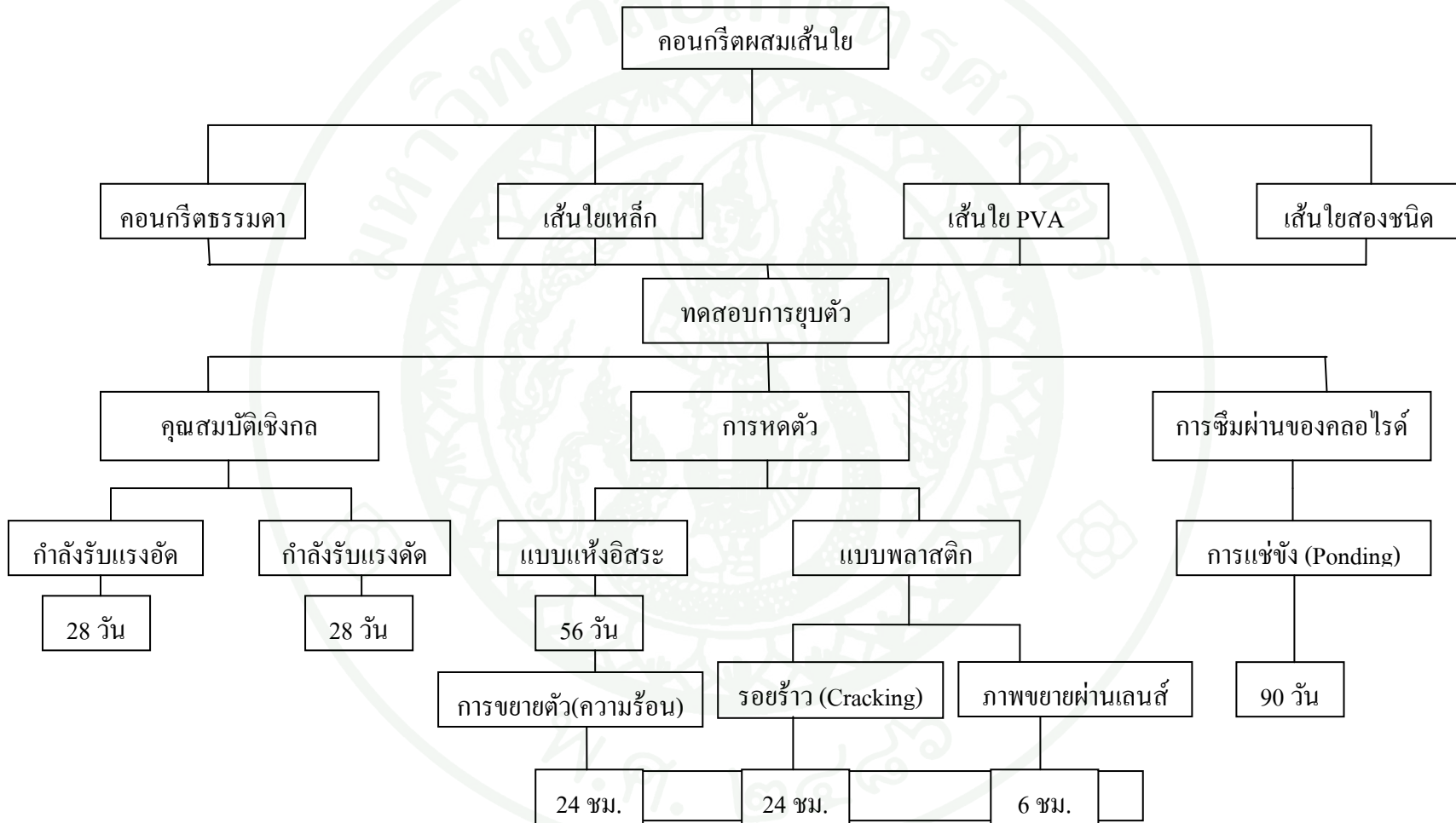
การออกแบบอัตราส่วนผสมคอนกรีตเป็นไปตามมาตรฐาน ACI 211 โดยกำหนดกำลังประลัยของตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วันเท่ากับ 240 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร (โดยไม่ใช้สารกักกระจายฟองอากาศ) และกำหนดค่าการยุบตัวของคอนกรีตเท่ากับ  $20 \pm 2$  เซนติเมตร โดยออกแบบให้มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.6 ใช้สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำอย่างมาก 1% อัตราส่วนปูนซีเมนต์ : หิน : ทราย เท่ากับ 1 : 2.67 : 2.19 โดยอัตราส่วนผสมเส้นใยในคอนกรีตแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมโดยปริมาตรของเส้นใยในคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

Type of FRC	Fiber	Fiber	
	Steel:PVA %	Steel	PVA
			kg/m <sup>3</sup>
Plain	0.00:0.00	-	-
PVA	0.00:0.50	-	6.5
PVA	0.00:1.00	-	13.0
Steel	0.50:0.00	39.0	-
Steel	1.00:0.00	78.0	-
Hybrid	0.50:0.50	39.0	6.5
Hybrid	0.25:0.75	19.5	9.75
Hybrid	0.75:0.25	58.5	3.25

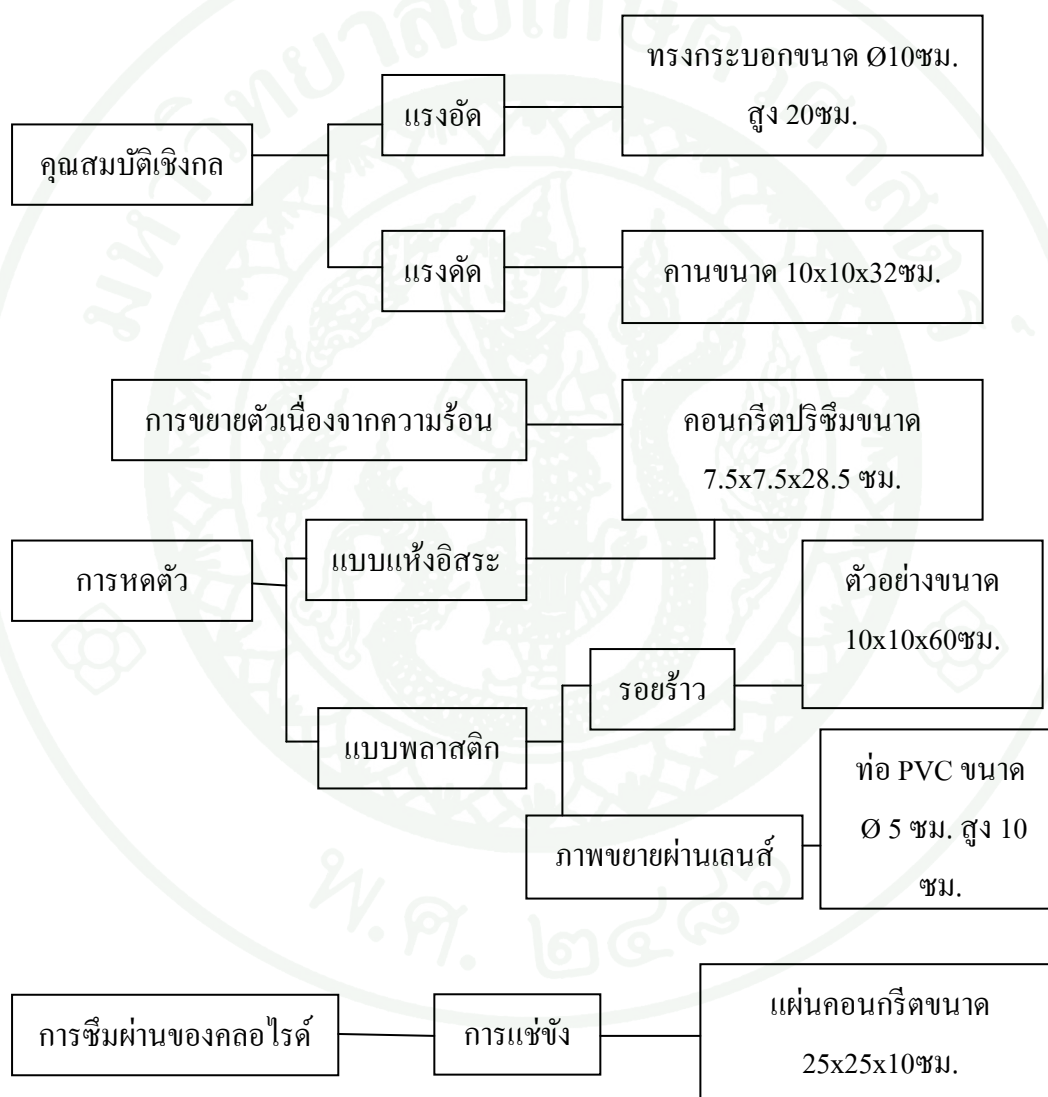
### การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

แผนภูมิการทดสอบการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกล การหดตัว และการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดี่ยว สองชนิดและคอนกรีตธรรมดาแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แผนภูมิการทดสอบทั้งหมด

การเตรียมตัวอย่างของแต่ละการทดสอบใช้แบบหล่อดังแสดงในภาพที่ 7 โดยมีจำนวนชิ้นตัวอย่างต่อหนึ่งอัตราส่วนผสมในการทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัดและการหัดตัวอิสระของคอนกรีตแบบแห้งใช้ 3 ตัวอย่าง การทดสอบการหัดตัวพลาสติกทั้งวิธีการประเมินจากรอยร้าวใช้ 3 ตัวอย่าง และวิธีการขยายภาพผ่านเลนส์ใช้ชิ้นตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง การทดสอบการซึมผ่านคลอไรด์โดยวิธีการแข่ง ในสภาวะเปียกสลับแห้ง 1 ตัวอย่างและในสภาวะอิมมิตัวตลอดเวลา 1 ตัวอย่าง



ภาพที่ 7 ขนาดของตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

การผสมเส้นใยใช้วิธีการผสมแบบเปียกด้วยเครื่องผสมคือ ผสม หิน ทราย ปูนซีเมนต์ ผสมให้เข้ากันก่อน เติมน้ำและสารลดน้ำแล้วจึงผสมเส้นใย คลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เข้าโดยใช้เวลา 5 นาที จากนั้นทำการเทคอนกรีตลงในแบบหล่อและอัดแน่นคอนกรีตโดยใช้โต๊ะสั่น แบ่งการเทเป็น 3 ชั้น สั่นชั้นละ 20 วินาที ภายหลังจากหล่อคอนกรีตทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออก จากนั้นบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 27 วัน

### วิธีการ

1. การทดสอบการยุบตัว (Slump Test) ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C 143 โดยเทคอนกรีตลงในแบบที่ใช้ทดสอบการยุบตัว แบ่งเทเป็น 3 ชั้น กระทุ้งชั้นละ 25 ครั้งแล้วดึงแบบขึ้นตรงๆ ในแนวตั้งแล้ววัดระยะการยุบตัว
2. การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength) ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C 39 โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ถอดแบบหลังจากหล่อแล้ว 24 ชั่วโมง จากนั้นบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 27 วัน ทดสอบกำลังอัดโดยตัวอย่างอยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง ก่อนการทดสอบทำการเคลือบปลายชิ้นตัวอย่างด้วยกัมมะถันเพื่อให้ผิวสัมผัสของชิ้นตัวอย่างเรียบ ติดตั้ง Compressometer เพื่อวัด Strain ดังภาพผนวกที่ 8 หลังจากนั้นทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM)
3. การทดสอบกำลังดัด (Flexural Strength) ใช้ตัวอย่างคานขนาด 10 x 10 x 35 เซนติเมตร ถอดแบบหลังจากหล่อแล้ว 24 ชั่วโมง จากนั้นบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 27 วันดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C 1609 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) แบบวงจรรปิด ทดสอบในขณะที่ตัวอย่างอยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง ให้น้ำหนักลงบนคานตัวอย่างสองจุด (Third-Point Loading) โดยความยาวช่วงคาน 30 เซนติเมตร ช่วงระหว่างแรงที่กดน้ำหนัก 10 เซนติเมตร ดังภาพผนวกที่ 9 ควบคุมอัตราการกดช่วงแรก 0.015 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที หลังจากเกิดรอยร้าวแรกควบคุมอัตราการกด 0.1% ความเครียดต่อนาที บันทึกค่าน้ำหนักบรรทุก (Load) และการโก่งตัว (Deflection) ทุกๆ 0.1 วินาที

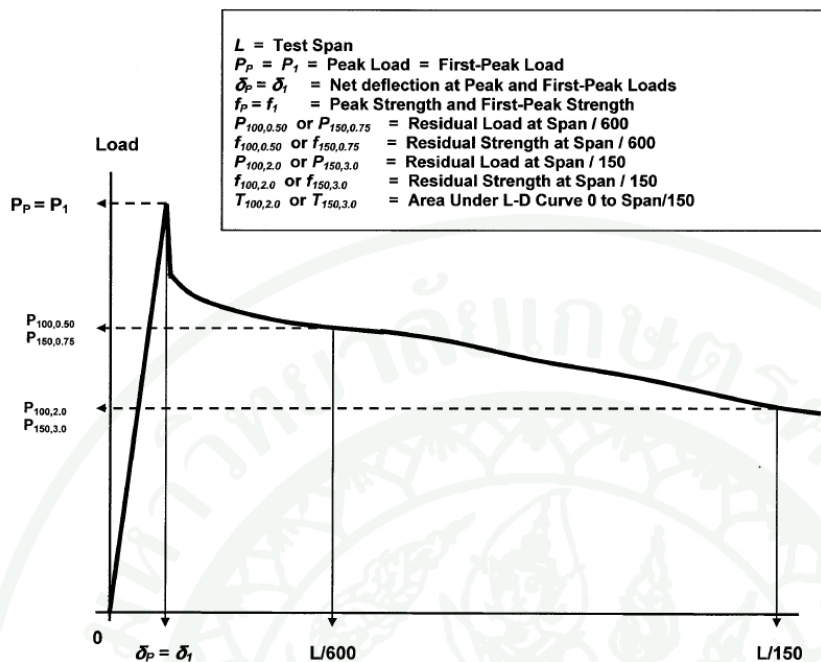
โมดูลัสการแตกร้าวสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (2)$$

โดยที่	R	=	โมดูลัสการแตกร้าว (กก./ซม. <sup>2</sup> )
	P	=	น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (กก.)
	L	=	ความยาวคาน (ซม.)
	b	=	ความกว้างคาน (ซม.)
	d	=	ความลึกคาน (ซม.)

ค่าการดูดซับพลังงานหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างกำลังรับแรงดัดกับระยะแอนตัว คำนวณโดยวิธี Trapezoidal Rule คือ การแบ่งพื้นที่ใต้กราฟออกเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูย่อยๆ หาพื้นที่ แล้วนำมารวมกัน การดูดซับพลังงาน (Energy Absorption) ที่มีค่าสูงแสดงว่าต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้น เพื่อให้คอนกรีตเกิดการวิบัติ ในการวิจัยนี้ใช้วิธีหาพื้นที่ใต้กราฟตั้งแต่ระยะการแอนตัวเริ่มต้นถึง ระยะการแอนตัว L/150 หรือ 0.2 เซนติเมตร เป็นค่าการดูดซับพลังงานเพื่อเปรียบเทียบคอนกรีต ตัวอย่างในการทดสอบ

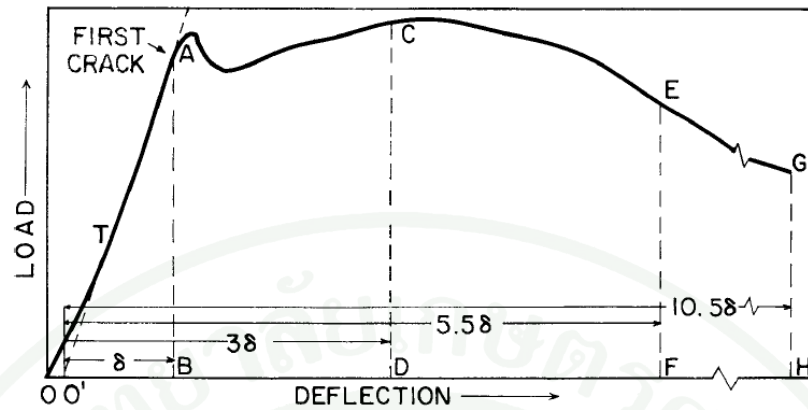
ค่าแรงคงค้าง (Residual Load) แสดงถึงความสามารถในการรับแรงของคอนกรีตหลังจากเกิดการแตกร้าวครั้งแรก (ASTM, 2006) การทดสอบคอนกรีตธรรมดาที่ใช้ทั่วไปเมื่อเกิดการแตกร้าวครั้งแรก คอนกรีตจะวิบัติทันที จึงไม่เหลือแรงคงค้าง แต่คอนกรีตผสมเส้นใยเมื่อเกิดการแตกร้าวครั้งแรก แม้จะไม่สามารถรับกำลังเพิ่มขึ้น แต่ยังมีเหลือแรงคงค้างจากการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับรอยร้าว ทำให้คอนกรีตยังแอนตัวได้หลังจากเกิดรอยร้าวแรก ช่วยให้คอนกรีตไม่เสียหาย โดย ค่ากำลังรับแรงคงค้างในการวิจัยนี้จะคำนวณจากเปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงสูงสุด ที่ระยะการแอนตัวที่ L/150 หรือ 0.2 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C 1609 ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การหาค่าแรงคงค้าง

ที่มา: ASTM C1609 (2006)

ค่าดัชนีความเหนียว (Toughness Index) เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้บ่งบอกได้ถึงพฤติกรรมของคอนกรีตหลังจากเกิดการแตกร้าวครั้งแรก โดยคำนวณหาได้จากสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงตัดและการเอนตัวของคานที่ระยะการเอนตัวต่างๆเปรียบกับระยะการเอนตัวที่เกิดรอยแตกร้าวแรก ตามมาตรฐาน ASTM C1018 (ASTM, 1997) ดังแสดงในภาพที่ 9 การวิจัยนี้จะเปรียบเทียบค่าดัชนีความเหนียว  $I_T$  ของอัตราส่วนผสมต่างๆ



ภาพที่ 9 การหาค่าดัชนีความเหนียว

ที่มา: ASTM C1018 (1997)

$$I_5 = \frac{\text{พื้นที่ OACD}}{\text{พื้นที่ OAB}} \quad (3)$$

$$I_{10} = \frac{\text{พื้นที่ OAEF}}{\text{พื้นที่ OAB}} \quad (4)$$

$$I_{20} = \frac{\text{พื้นที่ OAGH}}{\text{พื้นที่ OAB}} \quad (5)$$

โดยที่ พื้นที่ OAB = พื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกับการแอ่นตัว จากตำแหน่งเริ่มต้นจนถึงการแอ่นตัวที่การแตกร้าวครั้งแรก ( $\delta$ )

พื้นที่ OACD = พื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกับการแอ่นตัว จากตำแหน่งเริ่มต้นจนถึงการแอ่นตัว 3 เท่าของการแอ่นตัวที่การแตกร้าวครั้งแรก ( $3\delta$ )

พื้นที่ OAEF = พื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกับการแอ่นตัว จากตำแหน่งเริ่มต้นจนถึงการแอ่นตัว 5.5 เท่าของการแอ่นตัวที่การแตกร้าวครั้งแรก ( $5.5\delta$ )

พื้นที่ OAGH = พื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกับการแอ่นตัว จากตำแหน่งเริ่มต้นจนถึงการแอ่นตัว 10.5 เท่าของการแอ่นตัวที่การแตกร้าวครั้งแรก ( $10.5\delta$ )

4. การทดสอบการหดตัว (shrinkage) ทดสอบทั้งในช่วงที่เป็นคอนกรีตสด และเมื่อแข็งตัวแล้ว โดยแบ่งการทดสอบดังต่อไปนี้

4.1 การทดสอบการหดตัวแบบแห้งอิสระ (Free drying shrinkage) เป็นการทดสอบในช่วงคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C 157 โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตปริซึมขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 เซนติเมตรติดหมุดปลายตัวอย่างทั้งสองด้าน ถอดแบบหลังจากหล่อแล้ว 24 ชั่วโมง นำไปบ่มในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ  $23 \pm 2$  องศาเซลเซียส แล้ววัดค่าการหดตัวที่ 1 วันและทุกๆ สัปดาห์ ทั้งหมด 8 สัปดาห์ โดยใช้ Length Comparator

ความเครียดเนื่องจากการหดตัวแห้งคำนวณดังสมการนี้

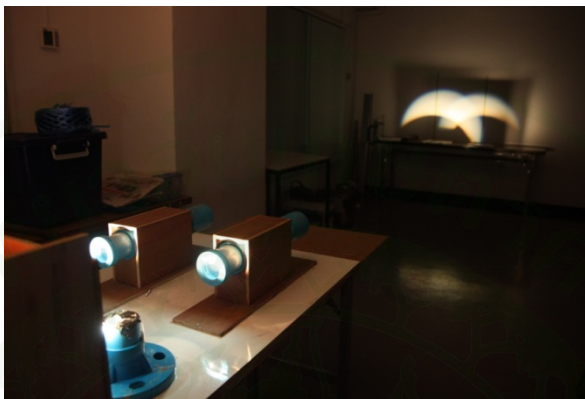
$$\Delta L_x = \frac{\text{CRD} - \text{initialCRD}}{G} \quad (6)$$

โดยที่	$\Delta L_x$	=	ความเครียดเนื่องจากการหดตัว
	CRD	=	ความยาวใหม่เปรียบเทียบกับความยาวแท่งอ้างอิง
	InitialCRD	=	ความยาวเดิมเปรียบเทียบกับความยาวแท่งอ้างอิง
	G	=	ความยาวเกจ (250 มิลลิเมตร)

4.2 การทดสอบการหดตัวแบบพลาสติก โดยใช้วิธีการประเมินจากรอยแตกร้าวจากการหดตัวพลาสติก (Plastic Shrinkage Cracking) โดยการทดสอบในช่วงที่คอนกรีตยังอยู่ในสภาพสด ซึ่งดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C 1579 โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10 x 10 x 60 เซนติเมตรจากภาพที่ 11 หลังจากเทคอนกรีตแล้ว นำไปบ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิ  $23 \pm 2$  องศาเซลเซียส ใช้ลมเป่าตัวอย่างอย่างสม่ำเสมอเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้ววัดค่าความกว้างของรอยร้าวทุกระยะ 1 เซนติเมตรบนรอยร้าวที่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า เพื่อนำไปคำนวณหาความกว้างรอยร้าวเฉลี่ยและพื้นที่ของรอยร้าวจากความกว้างเฉลี่ยและความยาวของรอยร้าว

4.3 การทดสอบการหดตัวแบบพลาสติก โดยใช้การขยายภาพผ่านเลนส์ เป็นการทดสอบในช่วงที่ยังเป็นคอนกรีตสด วัดการหดตัวจากภาพที่ฉายผ่านเลนส์นูนทำให้เกิดภาพเสมือนที่ขยายใหญ่ขึ้นดังภาพที่ 10 เทียบสัดส่วนกับการหดตัวที่เกิดขึ้นจริง โดยใช้ชุดโมเดลจำลองการทดสอบ เทคอนกรีตลงในท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร แล้วนำ

หมุดวางบนผิวหน้าของคอนกรีต ฉายภาพผ่านเลนส์เพื่อให้เกิดภาพที่มีกำลังขยายสูงกว่าภาพจริง แล้ววัดระยะเวลาการหดตัวเริ่มต้นและทุกๆ 15 นาทีครบ 1 ชั่วโมงแล้ววัดทุกๆ 1 ชั่วโมง รวมทั้งหมด 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 10 การทดสอบการหดตัวแบบพลาสติก โดยวิธีการขยายภาพผ่านเลนส์

5. การทดสอบการขยายตัวเนื่องจากความร้อน โดยนำตัวอย่างจากการทดสอบการหดตัวแบบแห้งอิสระที่ทดสอบเรียบร้อยแล้ว ติดหมุดกึ่งกลางตัวอย่างระยะห่างกัน 10 เซนติเมตร วัดระยะห่างของหมุดโดย multi length strain gauge ที่อุณหภูมิเริ่มต้น แล้วนำเข้าสู่ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยนำตัวอย่างฝังคลุมในทรายเพื่อควบคุมความร้อนให้สม่ำเสมอดังภาพที่ 11 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้ววัดความระยะห่างหมุดที่เปลี่ยนแปลงไปและอุณหภูมิหลังจากออกจากตู้อบทันที



ภาพที่ 11 การทดสอบการขยายตัวเนื่องจากความร้อน

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนคำนวณได้จากสมการนี้ (ASTM D 696, 2003)

$$C = \frac{R_h - R_c}{G\Delta T} \quad (7)$$

โดยที่ C = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน  
 $R_h$  = ความยาวที่อ่านได้ที่อุณหภูมิสูง  
 $R_c$  = ความยาวที่อ่านได้ที่อุณหภูมิต่ำ  
 G = ช่วงความยาวที่ใช้ในการทดสอบ  
 $\Delta T$  = ผลต่างของอุณหภูมิทั้งสอง

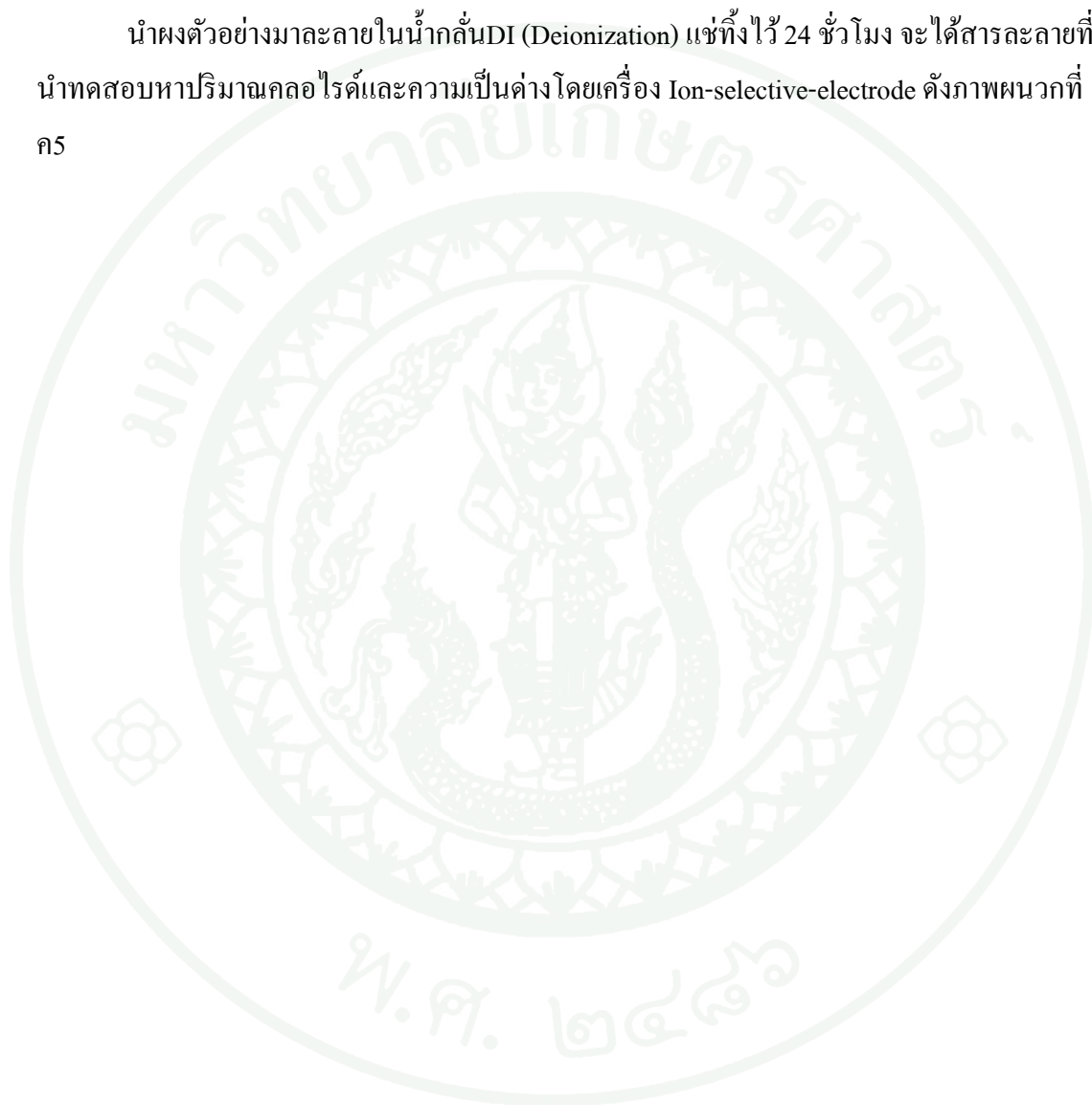
6. การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของคลอไรด์โดยวิธีการแช่ขัง (Ponding Penetration Test) ตามมาตรฐาน ASTM C 1543 โดยใช้ตัวอย่างแผ่นคอนกรีตสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด กว้าง 25 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร 2 ตัวอย่าง ถอดแบบหลังจากหล่อแล้ว 24 ชั่วโมง จากนั้นบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 27 วัน หลังจากนั้นทำคั้นกั้นบริเวณผิวหน้าของตัวอย่างสูง 3 เซนติเมตรดังภาพที่ 12 เพื่อแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ให้ซึมผ่านเฉพาะผิวหน้าของคอนกรีต โดยให้ตัวอย่างชิ้นหนึ่งอยู่ในสภาวะเปียกตลอดเวลาเป็นเวลา 90 วัน และอีกชิ้นหนึ่งอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยมีวงรอบของสภาวะเปียกสลับแห้ง 48 ชั่วโมง คือ เปียก 8 ชั่วโมง และแห้ง 40 ชั่วโมง เป็นเวลา 90 วัน โดยวงรอบของการเปียกสลับแห้งกำหนดเองเพื่อเป็นการจำลองให้คอนกรีตอยู่ในสภาวะที่สอดคล้องกับสภาวะที่เกิดขึ้นจริง



ภาพที่ 12 ตัวอย่างการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของคลอไรด์

เมื่อครบกำหนด 90 วัน ทำการเจาะคอนกรีตโดยใช้สว่านเฉลี่ย 3 จุดให้ได้ผงตัวอย่างอย่างน้อย 2-3 กรัม เก็บผงตัวอย่างที่ความลึกต่างๆ จากผิวคอนกรีตดังต่อไปนี้ คือ 10-20 มม. 25-35 มม. 40-50 มม. 55-65 มม.

นำผงตัวอย่างมาละลายในน้ำกลั่นDI (Deionization) แช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จะได้สารละลายที่นำทดสอบหาปริมาณคลอไรด์และความเป็นด่างโดยเครื่อง Ion-selective-electrode ดังภาพผนวกที่ ค5



## ผลและวิจารณ์

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและความคงทนของคอนกรีตผสมเส้นใยแบบสองประสานสามารถสรุปได้ ดังต่อไปนี้

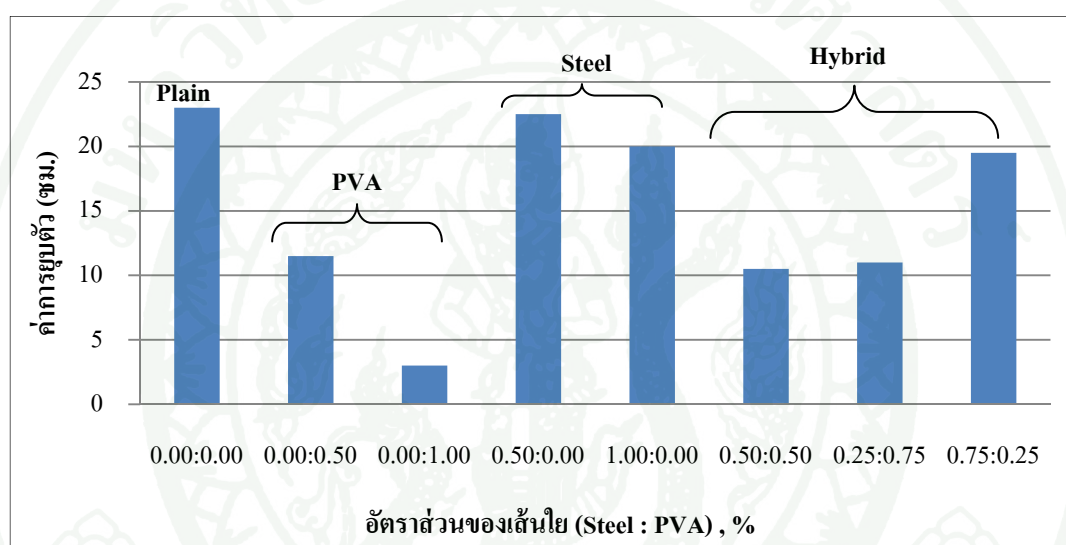
### ค่าการยุบตัว

เนื่องจากความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัสดุผสม ตัวอย่างเช่น รูปร่างของมวลรวมซึ่งมีลักษณะคล้ายทรงกลมทำให้การเคลื่อนที่ง่ายกว่าและลดการขัดกันทางกลมากกว่า รูปร่างของเส้นใยที่มีลักษณะเป็นเส้นเล็กๆสั้นๆ จึงไปกีดขวางการเคลื่อนที่และเกิดการขัดกันเชิงกลทั้งในตัวเองและกับวัสดุผสมอื่นๆ ทำให้คอนกรีตลื่นไหลยากขึ้น ดังนั้นเมื่อปริมาณเส้นใยในคอนกรีตเพิ่มขึ้น จึงส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตลดลง (Laetitia *et al.*, 2010)

จากการทดสอบความสามารถในการเทได้โดยการเปรียบเทียบค่าการยุบตัวของคอนกรีตโดยวิธีการ Slump Test ตัวอย่างคอนกรีตใช้สัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อหินต่อทรายเท่ากับ 1 : 2.67 : 2.19 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.6 ร่วมกับสารผสมเพิ่ม Superplasticizer 1% เป็นส่วนผสมควบคุม ผสมเส้นใยชนิดต่างๆตามอัตราส่วนที่กำหนด เพื่อศึกษาผลกระทบของเส้นใยที่มีต่อความสามารถในการเทได้ ผลการทดสอบค่าการยุบตัว ดังที่แสดงในภาพที่ 17 คอนกรีตล้วนค่าการยุบตัวเท่ากับ 23 เซนติเมตร คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 0.5 และ 1.0% มีค่าการยุบตัว 20-22 เซนติเมตร ลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา ในขณะที่เดียวกันปริมาณเส้นใยPVA 1.0% ได้ค่าการยุบตัวต่ำที่สุด โดยค่าการยุบตัวเท่ากับ 3 เซนติเมตร

ผลการศึกษาแสดงว่าเส้นใยPVA มีผลกระทบต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีตมากกว่าเส้นใยเหล็ก เนื่องจากมีความถ่วงจำเพาะต่ำและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าเส้นใยเหล็กมาก ดังนั้นเส้นใยPVA ที่มีปริมาตรเท่ากับเส้นใยเหล็กจะมีปริมาณและพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า ทำให้เกิดการขัดกันเชิงกลมากกว่า อีกทั้งเส้นใยPVA มีคุณสมบัติแบบ hydrophilic คือชอบและทำปฏิกิริยากับน้ำขณะผสมคอนกรีตทำให้ผิวสัมผัสยึดเกาะกับคอนกรีตได้ดี (Etuo Sekine *et al.*, 2008) จึงส่งผลให้ค่าการยุบตัวต่ำกว่าการผสมเส้นใยเหล็ก

คอนกรีตผสมเส้นใยสองชนิดที่มีปริมาณเส้นใยรวม 1.0% โดยอัตราส่วนเส้นใยเหล็กต่อ PVA 0.5:0.5 และ 0.25:0.75 มีค่าการยุบตัวใกล้เคียงกันคือ 11.0 และ 10.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าการยุบตัวสูงกว่าคอนกรีตผสมเส้นใย PVA 1.0% ชนิดเดียว เมื่อปริมาณเส้นใย PVA น้อยลง ดังอัตราส่วน 0.75:0.25 มีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นเท่ากับ 19.5 เซนติเมตร แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตผสมเส้นใยสองชนิดค่าการยุบตัวจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเส้นใย PVA ส่วนผสมที่มีเส้นใย PVA สูง ค่าการยุบตัวจะต่ำ เมื่อลดปริมาณเส้นใย PVA ลง ค่าการยุบตัวจะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 13 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Etuo Sekine *et al.* (2008)



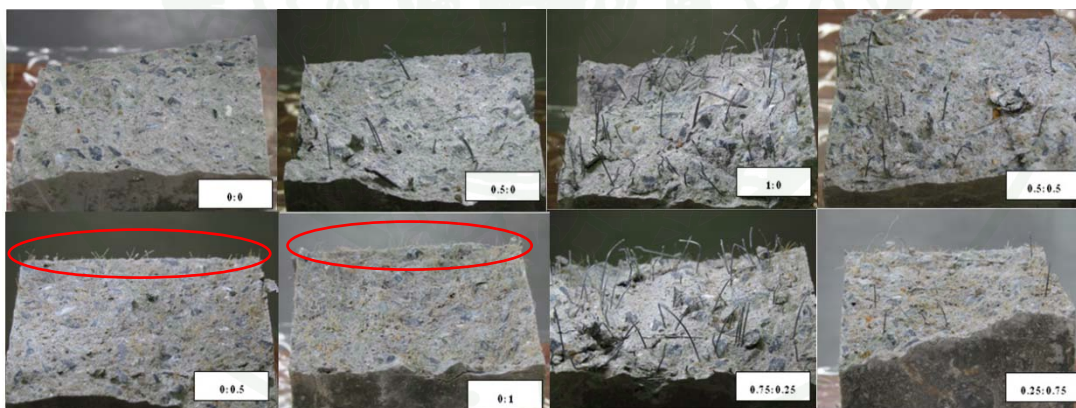
ภาพที่ 13 ผลการศึกษาค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเส้นใยเหล็กต่อเส้นใย PVA ต่างกัน

หมายเหตุ: 0.00:0.00 หมายความว่า เส้นใยเหล็ก 0% เส้นใย PVA 0% (ส่วนผสมคอนกรีตธรรมดา)  
 0.50:0.00 หมายความว่า เส้นใยเหล็ก 0.50% เส้นใย PVA 0% (ส่วนผสมที่มีปริมาณเส้นใยเหล็ก 0.50% ชนิดเดียว)

### การกระจายตัวของเส้นใย

การกระจายตัวและทิศทางของเส้นใยส่งผลต่อพฤติกรรมการรับแรงของคอนกรีตอย่างมาก ถ้าเส้นใยกระจายตัวสม่ำเสมอและเส้นใยที่มีทิศทางตั้งฉากกับแนวแรงในกรณีของแรงคัดหรือในแนวแกนกรณีของแรงดึงจะทำให้เส้นใยทำงานอย่างเต็มประสิทธิภาพ แต่ด้วยเส้นใยมีลักษณะเป็นเส้นสั้นๆ ขนาดเล็ก และมีจำนวนมาก คอนกรีตผสมเส้นใยจึงมีสมมติฐานว่าเส้นใยมีการกระจายตัวแบบสุ่มไม่มีทิศทางที่แน่นอน

จากที่ได้กล่าวข้างต้นเกี่ยวกับความสำคัญของการกระจายตัวของเส้นใยในคอนกรีต ในการหล่อตัวอย่างคอนกรีตเข้าแบบจึงใช้แรงสั่นเพื่อให้คอนกรีตอัดแน่นและให้เส้นใยกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอแบบสุ่ม แต่เนื่องจากเส้นใย PVA มีขนาดเล็กมาก จึงยากต่อการระบุการกระจายตัวออกมาเป็นตัวเลข อย่างไรก็ตามสามารถสังเกตได้จากภาพที่ 14 เป็นภาพถ่ายจากตัวอย่างคอนกรีต หลังจากการทดสอบกำลังรับแรงคัด จะเห็นว่าเส้นใยกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ ไม่กระจุกตัว และทิศทางของเส้นใยส่วนใหญ่ขนานกับความยาวคาน โดยที่วงรีในรูปซ้ายสองรูปล่าง บ่งชี้ลักษณะการกระจายตัวของเส้นใย PVA ที่เห็นชัดเจนบริเวณขอบรูป

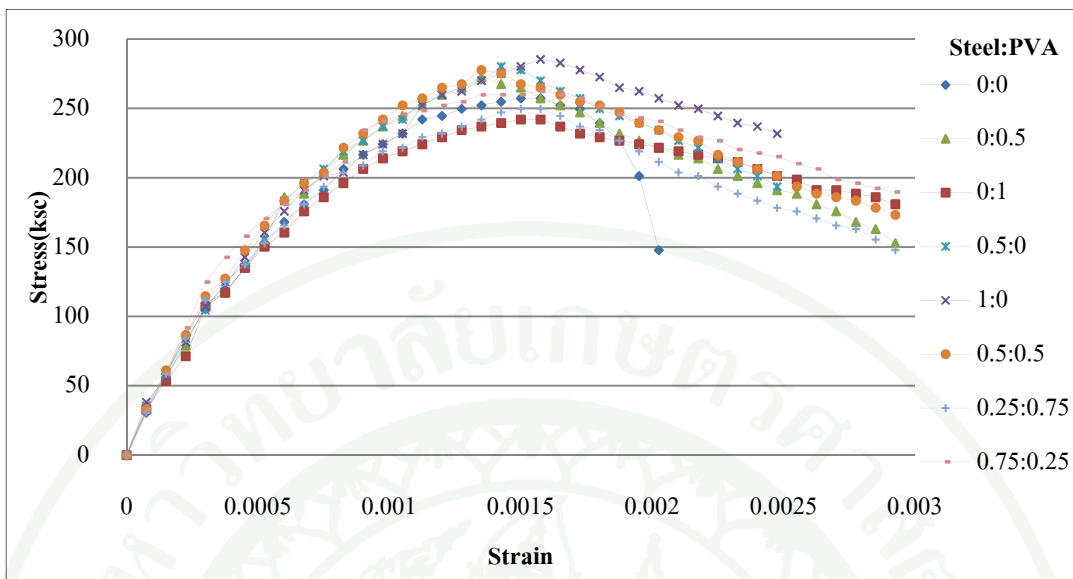


ภาพที่ 14 การกระจายตัวของเส้นใยในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนเส้นใยเล็กต่อเส้นใย PVA ต่างกัน

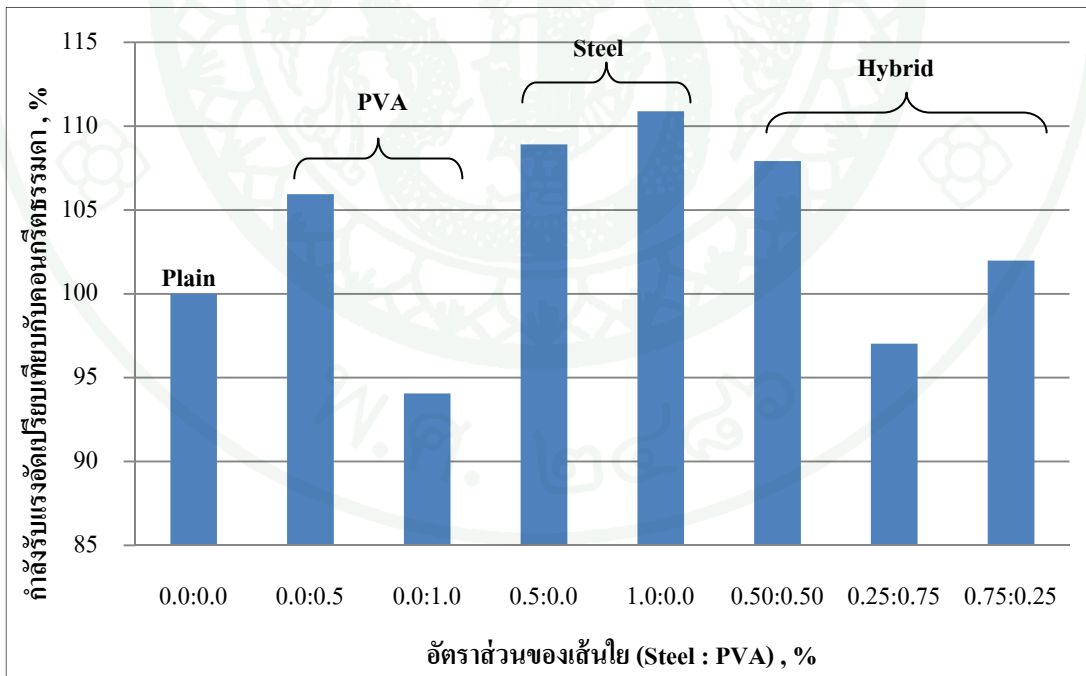
### กำลังรับแรงอัด

การผสมเส้นใยลงในคอนกรีตเป็นไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติอื่นและไม่ได้มีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดโดยตรง แต่ถ้าใช้ในปริมาณมากเกินไปกลับมีผลทำให้กำลังอัดลดลง เนื่องจากปริมาณเส้นใยสูงมีผลทำให้ความสามารถในการเทได้ต่ำ การอัดแน่นทำได้ยาก ภาพที่ 15 แสดงแนวโน้มและการเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับแรงอัดของคอนกรีต 1 ชั้นตัวอย่างจากตัวอย่างแต่ละชุด โดยข้อมูลทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข จะเห็นได้ว่าแนวโน้มพฤติกรรมการรับแรงอัดใกล้เคียงกัน และค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตผสมเส้นใยใกล้เคียงกัน จากภาพที่ 16 จะเห็นว่าคอนกรีตผสมเส้นใย PVA 0.5% สามารถรับกำลังแรงอัดได้สูงกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณ 6% แต่เมื่อผสมเส้นใย PVA เพิ่มเป็น 1.0% ทำให้รับกำลังแรงอัดได้ลดลงต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา เนื่องจากความสามารถในการเทได้ต่ำ ทำให้การบดอัดแน่นเป็นไปได้ยาก ขณะเดียวกันการผสมเส้นใยเหล็ก 0.5% และ 1.0% รับกำลังแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณ 9-11% จากค่าการยุบตัว 20 เซนติเมตรใกล้เคียงกับคอนกรีตธรรมดา เนื้อคอนกรีตจึงอัดแน่นได้ดี เส้นใยเหล็กมีการยึดเหนี่ยวทั้งระหว่างผิวสัมผัสและปลายของเส้นใยแบบงอทำให้ต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นในการจะทำให้คอนกรีตเสียหาย เช่นเดียวกับคอนกรีตผสมเส้นใยสองชนิดมีปริมาณของเส้นใยทั้งหมดรวมเท่ากับ 1.0% เท่ากับเส้นใยเดี่ยว สามารถรับกำลังแรงอัดได้ใกล้เคียงกัน โดยที่ส่วนผสมที่มีปริมาณเส้นใย PVA สูงทำให้ความสามารถในการเทได้ต่ำ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงด้วยเล็กน้อย

อย่างไรก็ตาม แม้การผสมเส้นใยไม่ได้ทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นโดยตรง แต่พฤติกรรมการเสียหายของคอนกรีตผสมเส้นใยจะเปลี่ยนไปโดยหลังจากรับแรงสูงสุดคอนกรีตยังคงสามารถต้านทานแรงอัดได้โดยค่อยๆลดกำลังลง และมีพฤติกรรมการวิบัติแบบไม่เฉียบพลันต่างจากคอนกรีตล้วน เนื่องจากการยึดรั้งของเส้นใย เช่นกันกับงานวิจัยของ Bensaid *et al.* (2012)



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดกับการเสียรูปของคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเดี่ยวและสองชนิด



ภาพที่ 16 ความสามารถในการรับกำลังแรงอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดี่ยวและสองชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา

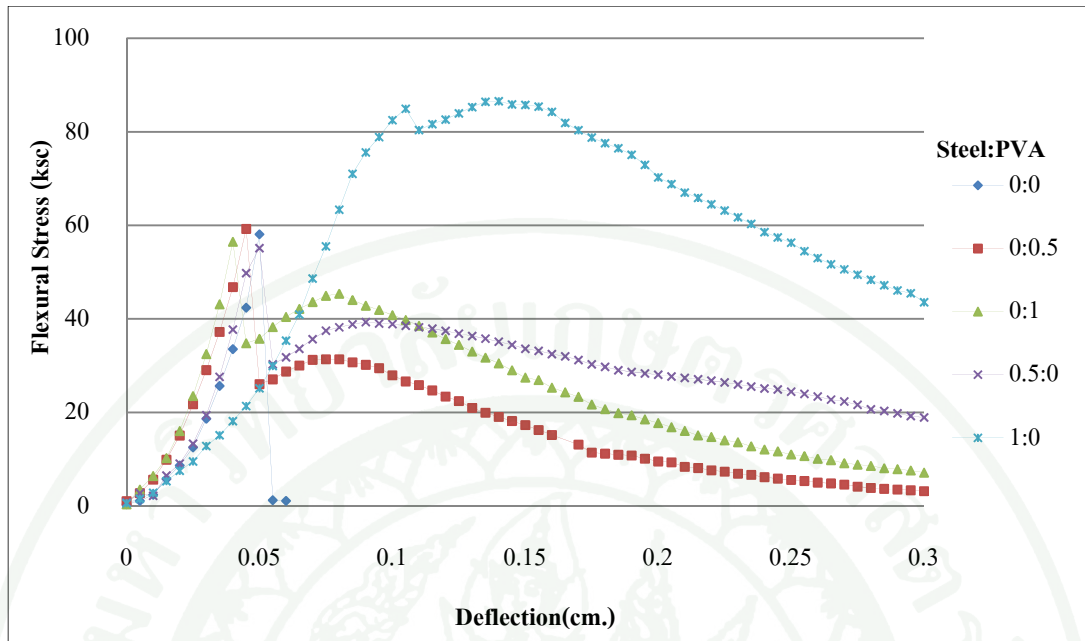
### ผลทดสอบกำลังรับแรงดัด

จากการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine ให้น้ำหนักโดย Third point loading ผลการทดสอบ ตัวอย่างคอนกรีตเกิดการวิบัติภายใต้แรงดัด หลังจากเกิดรอยแตกร้าวแรก โดยปรากฏรอยร้าวอยู่ระหว่างตำแหน่งของแรงกดเกิดขึ้นเพียง 1 รอย ภาพที่ 17 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดกับการแอ่นตัวของคอนกรีต 1 ชั้น ตัวอย่าง โดยข้อมูลทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข จะสังเกตเห็นว่า เมื่อความเค้นดัดถึงจุดแตกร้าวแรกตัวอย่างคอนกรีตธรรมดา จะเกิดการวิบัติทันที แต่หลังจากเกิดรอยร้าวแรก คอนกรีตผสมเส้นใย แม้จะมีกำลังลดลงอย่างกะทันหัน แต่ไม่เสียหายทันที โดยยังสามารถรับกำลังดัดและโก่งตัวได้เพิ่มขึ้น ในบางกรณียังสามารถรับกำลังได้เพิ่มขึ้นสูงกว่ากำลังรับแรงที่จุดรอยร้าวแรก ทำให้ไม่เกิดความเสียหายโดยเฉียบพลัน

คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กชนิดเดียว โดยมีปริมาณเส้นใย 0.5% รับกำลังดัดสูงสุดได้ 55.15 ksc และคอนกรีตผสมเส้นใย PVA ชนิดเดียว 0.5% มีกำลังดัดสูงสุด 59.26 ksc ซึ่งเกิดจุดรอยร้าวแรก และทั้งสองกรณีมีพฤติกรรมแบบ Deflection Softening กำลังรับแรงดัดสูงสุดไม่ต่างกับคอนกรีตธรรมดา ซึ่งรับกำลังสูงสุดได้ 58.11 ksc ดังในตารางผนวกที่ ข 1

เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น 1.0% ในกรณีของเส้นใยเหล็ก พบว่ากำลังสูงสุดที่ทำให้เกิดรอยร้าวแรกเท่ากับ 84.94 ksc หลังจากนั้น คอนกรีตยังสามารถรับกำลังแรงดัดได้เพิ่มขึ้นได้จนมีค่าสูงสุดหลังจากเกิดรอยร้าวเท่ากับ 86.56 ksc ซึ่งสูงกว่ากำลังรับแรงดัดที่จุดที่เกิดรอยร้าวแรก นั่นคือมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงเป็น Deflection Hardening ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กที่มากพอสามารถเปลี่ยนพฤติกรรมการโก่งตัวของคอนกรีตได้

กรณีคอนกรีตผสมเส้นใย PVA 0.5% รับกำลังแรงดัดที่จุดที่เกิดรอยร้าวแรก 59.26 ksc หลังจากเกิดรอยร้าวแรกคอนกรีตสามารถรับกำลังสูงสุดได้ 31.37 ksc เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย PVA เป็น 1.0% รับกำลังแรงดัดที่จุดที่เกิดรอยร้าวแรกได้ 56.49 ksc หลังจากเกิดรอยร้าวแรกคอนกรีตสามารถรับกำลังสูงสุดได้ 45.38 ksc ดังแสดงในตารางผนวกที่ ข 1 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใย PVA สามารถเพิ่มกำลังรับแรงดัดหลังจากเกิดรอยร้าวแรกได้ แต่กำลังที่เพิ่มขึ้นยังน้อยกว่ากำลังรับแรงดัดที่จุดที่เกิดรอยร้าวแรก จึงยังคงมีพฤติกรรมเป็น Deflection Softening เช่นเดิม และถ้าเพิ่มปริมาณเส้นใยมากกว่านี้อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเทได้

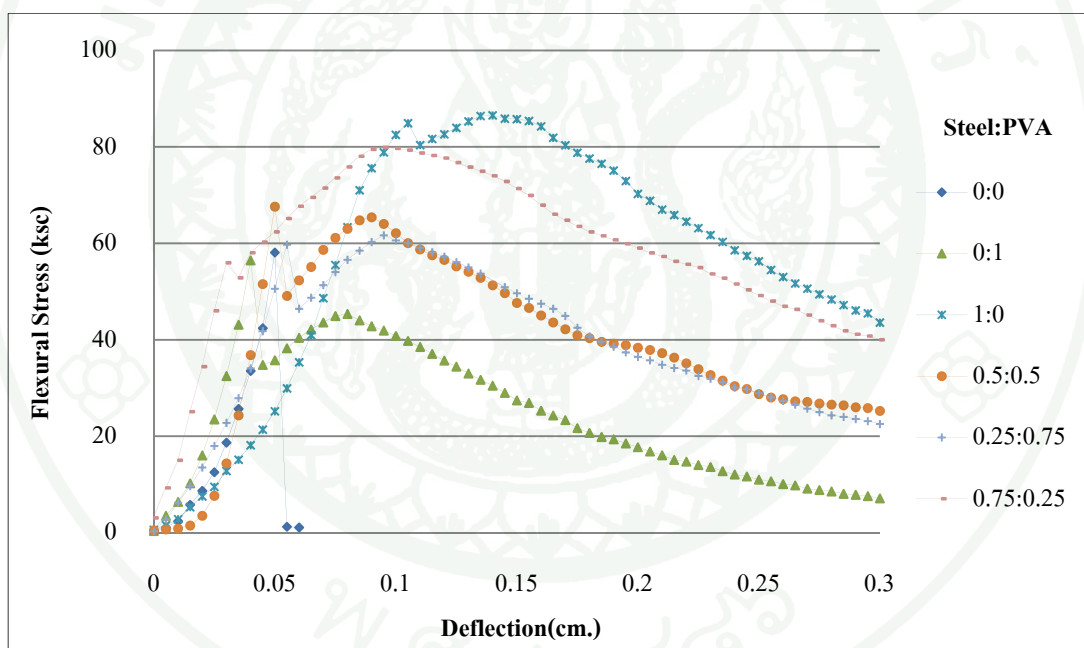


ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดกับการแอ่นตัวของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเดี่ยวในปริมาณต่างกัน

ภาพที่ 18 แสดงแนวโน้มพฤติกรรมการรับกำลังดัดจากตัวอย่างแต่ละอัตราส่วน 1 ชิ้น ตัวอย่างโดยการเปรียบเทียบตัวอย่างที่ใช้ปริมาณเส้นใยรวมทั้งหมด 1.0% รายละเอียดทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข จะสังเกตเห็นว่ากำลังดัดที่ทำให้เกิดรอยร้าวแรกของตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กชนิดเดียวที่มีกำลังและการโก่งตัวที่จุดที่เกิดรอยร้าวแรกสูงกว่าอัตราส่วนอื่น เนื่องจากเส้นใยเหล็กมีกำลังสูง และมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับเนื้อคอนกรีตได้ดี มีการดูดซับพลังงานสูง ทำให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้นที่จะทำให้คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กเกิดรอยร้าวแรก

ส่วนเส้นใย PVA ที่มีขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากชิดเกาะกับคอนกรีตได้ดี ถึงแม้ว่าความสามารถในการรับแรงดึงของเส้นใยเหล็กและเส้นใย PVA จะมีกำลังใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากเส้นใย PVA มีขนาดหน้าตัดน้อยกว่าเส้นใยเหล็ก ทำให้ความสามารถในการรับกำลังในแต่ละเส้นน้อยกว่า จึงเกิดการเสียหายเนื่องจากเส้นใยฉีกขาด เส้นใยเหล็กจึงมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติด้านการรับแรงได้ดีกว่าเส้นใย

ปริมาณของเส้นใยเหล็กส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใยแบบสอง  
 ประสาน ในกรณีของกำลังรับแรงดัด ตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กสูงจะสามารถรับกำลังแรงดัด  
 ได้สูง ดังในภาพที่ 18 ตัวอย่างอัตราส่วนเส้นใยเหล็กต่อเส้นใย PVA 0.75:0.25 สามารถรับกำลัง  
 แรงดัดสูงสุดได้ 79.93 ksc สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างการใช้เส้นใยสองชนิดร่วมกันใน  
 อัตราส่วนเส้นใยเหล็กต่อเส้นใย PVA 0.5:0.5 และ 0.25:0.75 ซึ่งมีปริมาณเส้นใยรวมเท่ากัน สามารถ  
 รับกำลังแรงดัดสูงสุดได้ 65.42 ksc และ 61.69 ksc ตามลำดับ ซึ่งกำลังรับแรงดัดสูงสุดของ  
 อัตราส่วน 0.75:0.25 และ 0.25:0.75 เกิดขึ้นหลังจากเกิดรอยร้าวแรก ซึ่งแสดงว่ามีพฤติกรรมเป็น  
 Deflection Hardening ส่วนอัตราส่วน 0.5:0.5 กำลังสูงสุดที่จูดรอยร้าวแรกและหลังเกิดรอยร้าวมีค่า  
 ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นการใช้เส้นใยสองชนิดร่วมกันสามารถถึงส่งผลต่อพฤติกรรมการโก่งตัวของ  
 คอนกรีตผสมเส้นใยด้วย ดังในตารางผนวกที่ ข1



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดกับการแอ่นตัวของคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสม  
 เส้นใยเดี่ยวและสองชนิดที่มีปริมาณเส้นใยรวม 1.0%

ค่าแรงคงค้าง การดูดซับพลังงาน และดัชนีความเหนียวของตัวอย่างคอนกรีตผสมเส้นใยใน  
 อัตราส่วนต่างๆ สรุปผลดังแสดงในตารางที่ 3

## แรงค้ำ

แรงค้ำเป็นดัชนีหนึ่งในการบ่งบอกประสิทธิภาพของคอนกรีตผสมเส้นใย โดยเปรียบเทียบระหว่างกำลังรับแรงดัดที่ระยะการแอนตัว  $L/150$  กับกำลังรับแรงดัดสูงสุด โดยคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ดี ควรต้องสามารถรับกำลังรับแรงดัดไว้ได้มาก ไม่สูญเสียแรงดัดสูงสุดไปในทันที

ค่าจากตารางที่ 3 คอนกรีตธรรมดาเมื่อกำลังรับแรงดัดถึงจุดแตกร้าวแรกเกิดการวิบัติทันที ไม่มีแรงค้ำอยู่เหลือ เมื่อผสมเส้นใยทั้งเส้นใยเหล็กและเส้นใย PVA คอนกรีตยังสามารถรับแรงได้หลังจากเกิดรอยร้าวแรกแล้ว และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย แรงค้ำก็เพิ่มขึ้นด้วย โดยคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 1.0% มีค่าแรงค้ำสูงสุดเท่ากับ 81.19% สามารถรับแรงไว้ได้ดีกว่าเส้นใย PVA 1.0% ที่มีแรงค้ำ 31.41% ดังแสดงในภาพที่ 19 ทั้งนี้ปริมาณเส้นใย 1.0% เส้นใยเหล็กค่าแรงค้ำจะเทียบกับค่าแรงสูงสุดหลังจากเกิดรอยร้าวแรก เนื่องจากมีพฤติกรรมเป็น Deflection Hardening ส่วนเส้นใย PVA เทียบค่าแรงค้ำกับกำลังที่จุดรอยร้าวแรก เนื่องจากมีพฤติกรรมเป็น Deflection Softening

การนำเส้นใยสองชนิดมาใช้ร่วมกันทำให้ประสิทธิภาพในการรับแรงค้ำเพิ่มขึ้น ดังในตัวอย่างอัตราส่วน 0.25:0.75 ปริมาณเส้นใยรวม 1.0% โดยมีปริมาณเส้นใยเหล็กทดแทนปริมาณเส้นใย PVA เพียง 0.25% ยังสามารถรับแรงค้ำได้สูงกว่าคอนกรีตผสมเส้นใย PVA ชนิดเดียว 1.0% เกือบสองเท่า

## การดูดซับพลังงาน

การดูดซับพลังงานหรือค่า  $J$  หาจากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงดัดกับการโก่งตัวของตัวอย่าง จากจุดเริ่มการทดสอบถึงการแอนตัว 2 มิลลิเมตร ( $L/150$ ) หากวัสดุมีค่าการดูดซับพลังงานสูง แสดงว่าต้องใช้พลังงานมากในการทำให้อุบัติ ซึ่งบ่งชี้ว่าวัสดุนี้จะมีความต้านทานต่อการเสียหายและมีความเหนียว ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่พึงประสงค์ (ASTM C 1609)

ค่าจากตารางที่ 3 แสดงว่าคอนกรีตธรรมดามีการดูดซับพลังงานน้อยมาก เมื่อกำลังรับแรง ดัดถึงจุดแตกร้าวแรกจึงเกิดการวิบัติทันที การดูดซับพลังงานของคอนกรีตผสมเส้นใยมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย จากภาพที่ 20 คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต ธรรมดา มีค่าการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น 600-1000% สูงกว่าการผสมเส้นใย PVA ที่มีค่าการดูดซับ พลังงานเพิ่มขึ้น 400-500% เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา การนำเส้นใยทั้งสองชนิดมาใช้ ร่วมกัน ในอัตราส่วนเส้นใยเหล็กต่อเส้นใย PVA 0.5:0.5 และ 0.25:0.75 ดูดซับพลังงานได้สูงกว่า คอนกรีตผสมเส้นใย PVA ชนิดเดียว 1.0% และคอนกรีตผสมเส้นใยแบบสองประสานอัตราส่วน เส้นใยเหล็กต่อเส้นใย PVA 0.75:0.25 สามารถดูดซับพลังงานได้สูงสุดถึง 421.42 จูล ซึ่งมากกว่า คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กชนิดเดียว 1.0%

### ค่าดัชนีความเหนียว

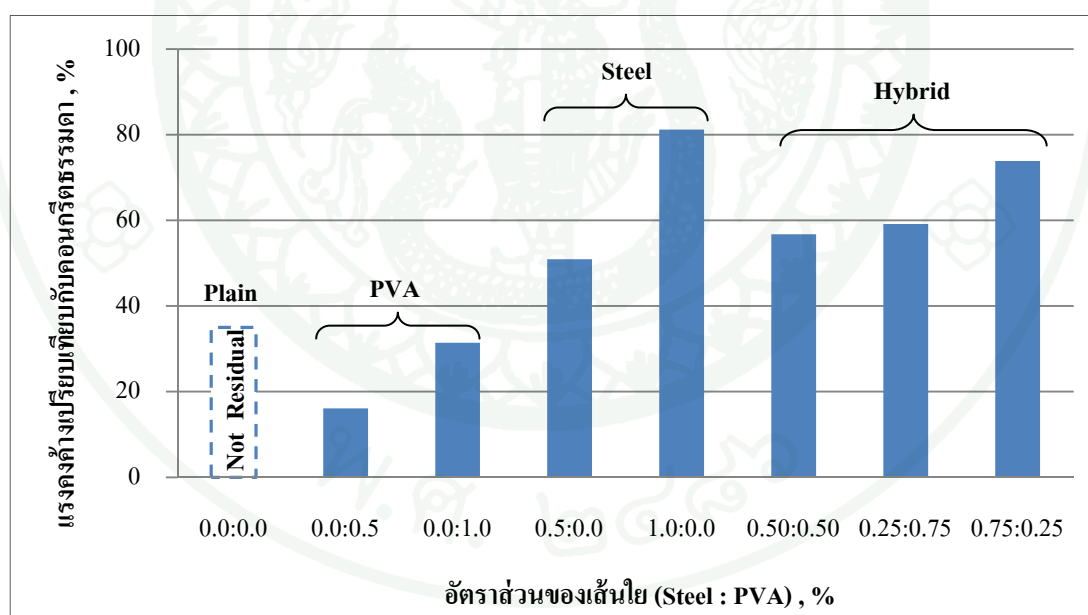
ค่าดัชนีความเหนียว I5 (Toughness Index) ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการรับแรงได้ หลังการแตกร้าวแรก หาได้จากอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟแรงดัดและการโก่งตัว ที่การโก่งตัว 3 เท่า ของการโก่งตัวที่จุดแตกร้าวแรก เทียบกับพื้นที่ใต้กราฟที่จุดแตกร้าวแรก ซึ่งหากมีค่าใกล้เคียงกับ 5 แสดงว่าวัสดุมีพฤติกรรมเป็น Elastic-Plastic (ASTM C1018)

ค่าจากตารางที่ 3 จะสังเกตได้ว่า คอนกรีตธรรมดา มีค่าดัชนีความเหนียว 1.17 แสดงว่าเป็น วัสดุเปราะ ค่าดัชนีความเหนียว ของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กอัตราส่วนเส้นใย 0.5% และ 1.0% มี ค่าใกล้เคียงกันประมาณ 4.76 แสดงว่ามีพฤติกรรมเป็น Elastic-Plastic สำหรับเส้นใย PVA 0.5% ดัชนีความเหนียว 3.56 เมื่อปริมาณของเส้นใยเป็น 1.0% ได้ค่าดัชนีความเหนียว 5.01 แสดงว่าเมื่อ เพิ่มปริมาณเส้นใยพฤติกรรมของวัสดุค่อยๆ เปลี่ยนเข้าใกล้ความเป็น Elastic-Plastic ซึ่งมีความ เหนียวเพิ่มขึ้น จากภาพที่ 20 คอนกรีตผสมเส้นใยมีประสิทธิภาพในด้านความเหนียวเพิ่มขึ้น ประมาณ 400-500% เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา

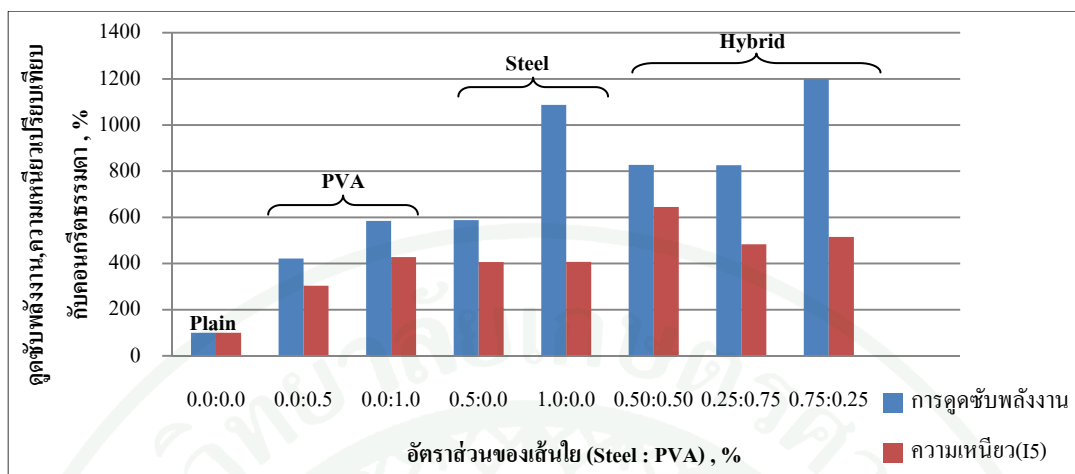
คอนกรีตผสมเส้นใยแบบสองประสาน มีค่าดัชนีความเหนียวสูงกว่าคอนกรีตผสมเส้นใย ชนิดเดียว โดยอัตราส่วนเส้นใยเหล็กต่อเส้นใย PVA 0.5:0.5 มีค่าความเหนียว 7.55 ค่าดัชนีความ เหนียวเพิ่มขึ้นประมาณ 600% เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุด

ตารางที่ 3 พฤติกรรมการโค้งตัว แรงคงค้าง การดูดซับพลังงาน และความเหนียวของชิ้นตัวอย่าง

Steel:PVA	พฤติกรรม การโค้งตัว	แรงคงค้าง(%)	การดูดซับ พลังงาน(J)	ค่าดัชนีความ เหนียว(I5)
0.00:0.00	Softening	0.00	35.15	1.17
0.00:0.50	Softening	16.07	148.13	3.56
0.00:1.00	Softening	31.41	205.52	5.01
0.50:0.00	Softening	50.90	206.75	4.76
1.00:0.00	Hardening	81.19	382.20	4.77
0.50:0.50	Softening/Hardening	56.74	290.79	7.55
0.25:0.75	Hardening	59.13	290.43	5.66
0.75:0.25	Hardening	73.87	421.42	6.04



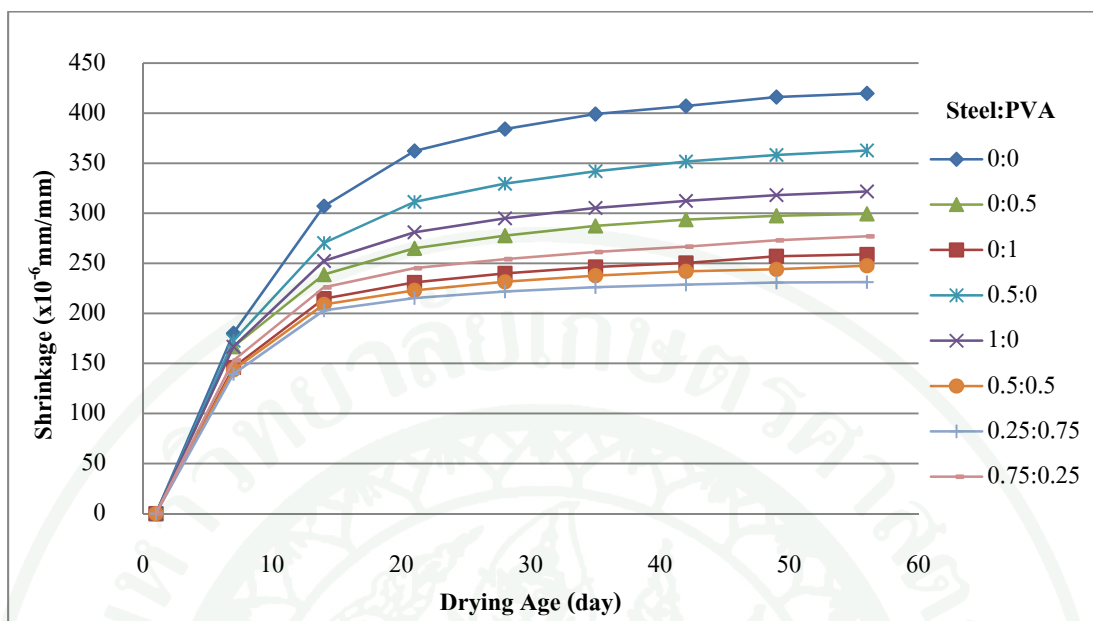
ภาพที่ 19 แรงคงค้างของคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดี่ยวและสองชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



ภาพที่ 20 การดูดซับพลังงานและความเหนียวของคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดียวและสองชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา

#### ผลการทดสอบการหดตัวอิสระของคอนกรีตแบบแห้ง

การหดตัวอิสระของคอนกรีตแบบแห้งทดสอบโดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตปริซึมคubic ที่ปลายทั้งสอง วัดการหดตัวด้วย Length Comparator หลังจากหล่อ 1 วันเป็นค่าเริ่มต้นและวัดทุกๆ 7 วัน เป็นเวลา 56 วัน โดยบ่มไว้ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวอิสระของคอนกรีตแบบแห้งกับระยะเวลาของคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเดี่ยวและสองชนิด

คอนกรีตตัวอย่างทุกอัตราส่วนมีการหดตัวมาอย่างรวดเร็ว ในช่วง 21 วันแรก หลังจากนั้นยังมีแนวโน้มการหดตัวแต่เป็นไปอย่างช้าๆ ในการทดสอบการหดตัวอิสระของคอนกรีตแบบแห้งที่ 56 วัน ดังแสดงในตารางผนวกที่ ข2 คอนกรีตธรรมดามีการหดตัวเท่ากับ  $419.78 \times 10^{-6}$  มม./มม. เมื่อผสมเส้นใยเหล็ก 0.5% และ 1.0% เกิดการหดตัว  $362.78 \times 10^{-6}$  มม./มม. และ  $321.83 \times 10^{-6}$  มม./มม. ตามลำดับ ในกรณีของการผสมเส้นใย PVA 0.5% และ 1.0% เกิดการหดตัว  $299.44 \times 10^{-6}$  มม./มม. และ  $258.89 \times 10^{-6}$  มม./มม. ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการผสมเส้นใยทั้งสองชนิดช่วยลดการหดตัวอิสระของคอนกรีตแบบแห้งได้เป็นอย่างดี ปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นส่งผลให้การหดตัวของคอนกรีตลดลง โดยเส้นใย PVA ช่วยลดการหดตัวอิสระของคอนกรีตแบบแห้งได้สูงกว่าเส้นใยเหล็ก

ในกรณีของคอนกรีตผสมเส้นใยแบบสองประสานอัตราส่วนผสมเส้นใยเหล็กต่อเส้นใย PVA 0.5:0.5, 0.25:0.75 และ 0.75:0.25 คอนกรีตเกิดการหดตัว  $247.67 \times 10^{-6}$  มม./มม. ,  $231.22 \times 10^{-6}$  มม./มม. และ  $277.00 \times 10^{-6}$  มม./มม. ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำเส้นใยทั้งสองชนิดมาใช้ร่วมกัน ทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดการหดตัวได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดียว

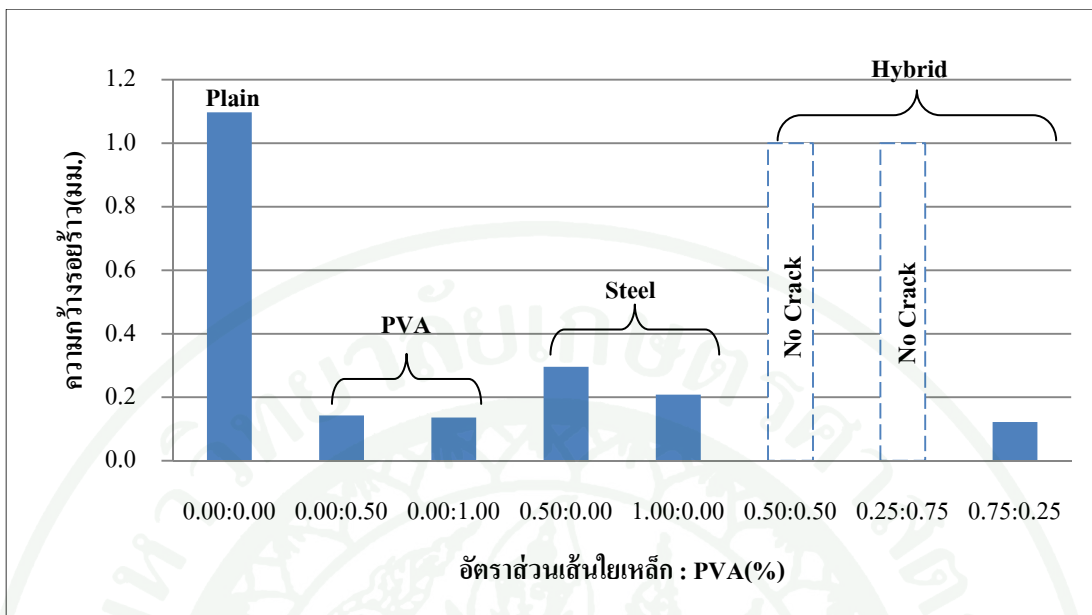
## ผลการทดสอบการหดตัวของแบบพลาสติก

การทดสอบการหดตัวของแบบพลาสติกเป็นการทดสอบในช่วงที่ตัวอย่างยังเป็นคอนกรีตสด ซึ่งทำการทดสอบ 2 วิธี คือ การประเมินจากรอยแตกร้าว และการขยายภาพผ่านเลนส์

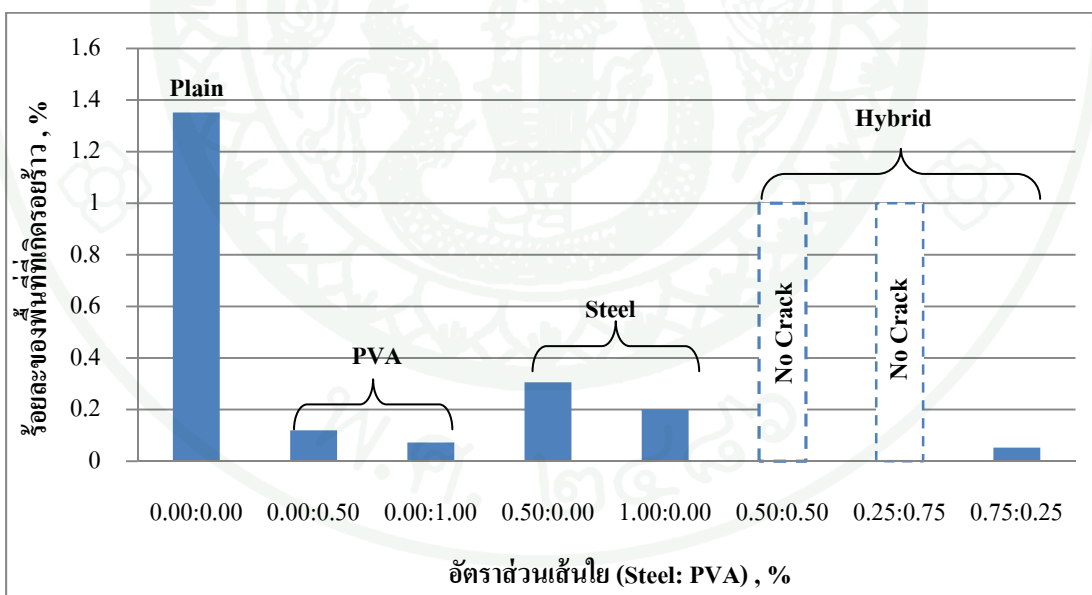
### 1 การประเมินจากรอยแตกร้าว

ลักษณะรอยร้าวของตัวอย่างคอนกรีตพบบริเวณเหนือสันกึ่งกลางของแบบหล่อ มีลักษณะเป็นเส้นตรง วัดความกว้างทุกๆ 1 เซนติเมตร บนรอยร้าวที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ทั้งหมดที่เกิดขึ้นบนพื้นที่ 10x10 เซนติเมตร บริเวณกึ่งกลางของแบบหล่อนำมาหาค่าเฉลี่ยและหาพื้นที่ของรอยร้าวจากความกว้างของแต่ละความยาวทุก 1 เซนติเมตรคูณกับความยาวทั้งหมด คอนกรีตธรรมดามีความกว้างเฉลี่ย 1.01 มิลลิเมตร และมีพื้นที่ของรอยร้าวที่เกิดบนความพื้นที่ผิวคอนกรีต 10x10 เซนติเมตร บริเวณกึ่งกลางของแบบหล่อเท่ากับร้อยละ 1.35 ดังแสดงในภาพที่ 22 และภาพที่ 23 เมื่อผสมเส้นใยสามารถช่วยลดความกว้าง และพื้นที่ของรอยร้าวของคอนกรีตสดอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตผสมเส้นใยสามารถช่วยลดการหดตัวของแบบพลาสติกของคอนกรีตสดได้เป็นอย่างดี โดยที่เส้นใย PVA 0.5-1.0% มีพื้นที่รอยร้าวเท่ากับร้อยละ 0.12 -0.72 ส่วนเส้นใยเหล็ก 0.5%-1.0% มีพื้นที่รอยร้าวเท่ากับร้อยละ 0.31-0.20 จะสังเกตเห็นว่าปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นสามารถช่วยการหดตัวของแบบพลาสติกของคอนกรีตสดได้เพิ่มขึ้น โดยความกว้างและพื้นที่รอยร้าวจากการหดตัวของแบบพลาสติกของคอนกรีตสดแสดงในตารางผนวกที่ ข3

กรณีของคอนกรีตผสมเส้นใยแบบสองประสานในอัตราส่วนเส้นใยเหล็กต่อเส้นใย PVA 0.25:0.75 และ 0.5:0.5 ไม่ปรากฏรอยร้าวที่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่าดังแสดงในภาพผนวกที่ ข17 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำเส้นใยทั้งสองชนิดมาใช้ร่วมกัน ทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดการหดตัวของแบบพลาสติกได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดียว



ภาพที่ 22 ความกว้างรอยร้าวของคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเดี่ยวและสองชนิด

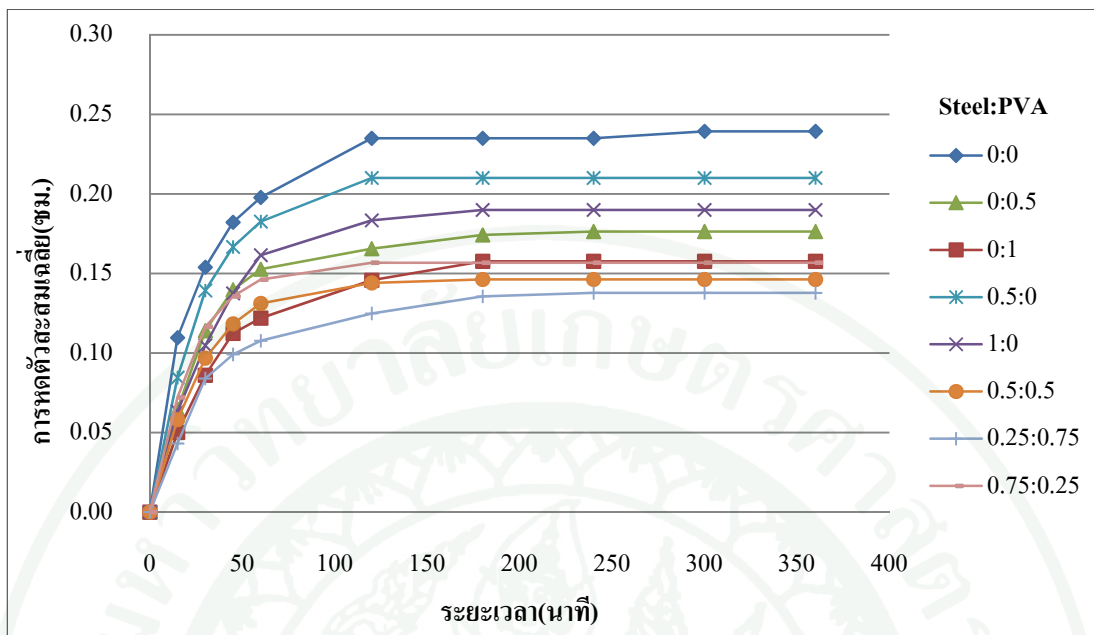


ภาพที่ 23 ความกว้างรอยร้าวของคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเดี่ยวและสองชนิด

## 2. การขยายภาพผ่านเลนส์

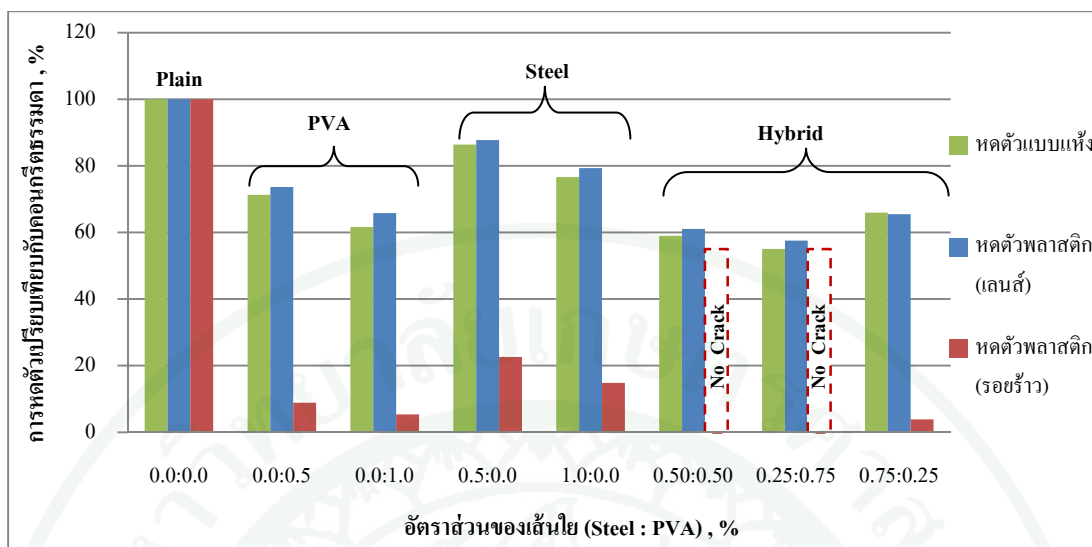
วิธีการขยายภาพผ่านเลนส์ ใช้หลักการฟิสิกส์อย่างง่ายมาประยุกต์ เพื่อศึกษาแนวโน้มของการหดตัวแบบพลาสติกของคอนกรีตสดในช่วง 360 นาทีแรกหลังจากการเทคอนกรีต ผลการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 24 ตัวอย่างคอนกรีตเกิดการหดตัวแบบพลาสติกอย่างรวดเร็วในช่วง 2 ชั่วโมงแรกหลังจากเทคอนกรีต หลังจากนั้นเริ่มชะลอการหดตัวลง คอนกรีตธรรมดาเกิดการหดตัวสะสมหลังจากเทคอนกรีต 360 นาที 0.239 เซนติเมตร ซึ่งหดตัวสูงที่สุด เมื่อผสมเส้นใยทั้งเส้นใยเหล็กและเส้นใยPVA การหดตัวลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยที่คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 0.5-1.0% คอนกรีตหดตัวสะสม 0.210-0.190 เซนติเมตร และเส้นใยPVA 0.5-1.0% คอนกรีตหดตัวสะสม 0.176-0.158 เซนติเมตร ดังแสดงในตารางผนวกที่ ข4 เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นช่วยให้คอนกรีตหดตัวลดลง โดยที่เส้นใย PVA ช่วยลดการหดตัวแบบพลาสติกได้มากกว่าเส้นใยเหล็ก

จากผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 24 คอนกรีตผสมเส้นใยแบบสองประสานอัตราส่วนเส้นใยเหล็กต่อเส้นใยPVA 0.50:0.50% และ 0.25:0.75% เกิดการหดตัวสะสม 0.146 เซนติเมตร และ 0.138 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนอัตราส่วน 0.75:0.25% ถึงแม้ว่าในช่วง 180 นาทีแรกเกิดการหดตัวสูงกว่าเส้นใยPVA 1.0% แต่หลังจากนั้นเกิดการหดตัวใกล้เคียงกับการผสมเส้นใยPVA ชนิดเดียว แสดงให้เห็นว่าการผสมเส้นใยสองชนิดรวมกันสามารถลดการหดตัวแบบพลาสติกในช่วง 6 ชั่วโมงแรกหลังจากเทคอนกรีตได้ดีกว่าการผสมเส้นใยชนิดเดียว โดยที่ปริมาณเส้นใยPVA ส่งผลกระทบต่อการหดตัวแบบพลาสติกของคอนกรีตสดมากกว่าเส้นใยเหล็ก ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบการหดตัวแบบพลาสติกโดยวิธีการประเมินจากรอยแตกร้าว



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของแบบพลาสติกกับระยะเวลาของคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเดี่ยวและสองชนิด

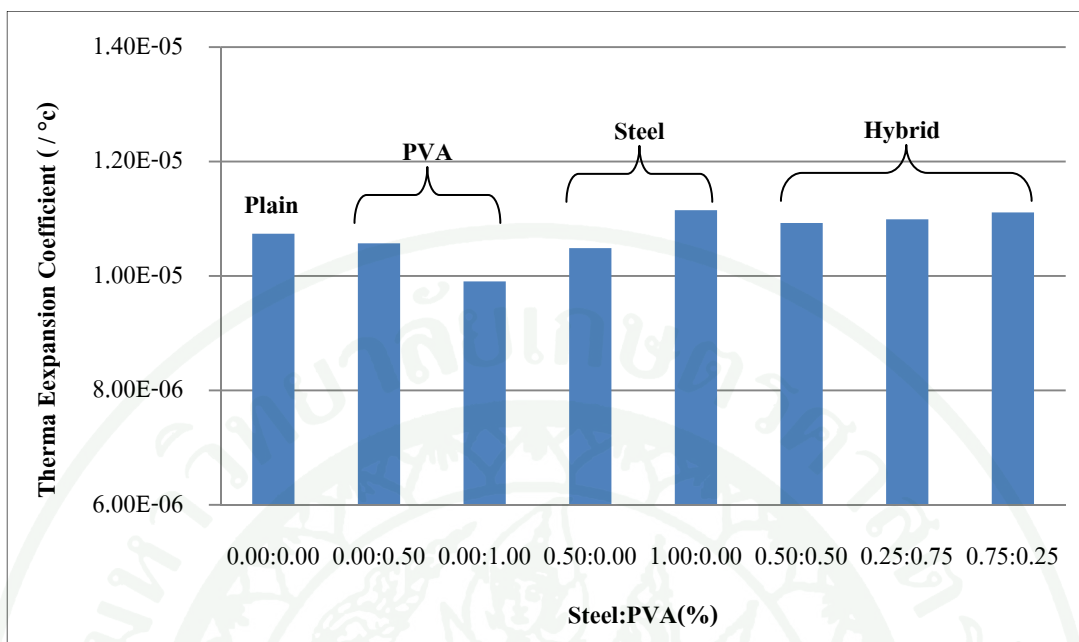
จากภาพที่ 25 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบการหดตัวอิสระคอนกรีตแบบแห้งและการหดตัวของแบบพลาสติกของคอนกรีตระหว่างคอนกรีตผสมเส้นใยและคอนกรีตธรรมดา การผสมเส้นใยช่วยลดการหดตัวทั้งแบบแห้งและแบบพลาสติกได้เป็นอย่างดี โดยเส้นใย PVA มีลักษณะเป็นเส้นสั้นๆ พื้นที่หน้าตัดมีขนาดเล็ก ในปริมาณที่เท่ากันจึงทำให้มีจำนวนมากกว่าเส้นใยเหล็ก ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยกับคอนกรีต เกิดแรงยึดเหนี่ยวมากกว่าเส้นใยเหล็ก เส้นใย PVA จึงส่งผลช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตทั้งแบบแห้งและแบบพลาสติกมากกว่าเส้นใยเหล็ก และการใช้เส้นใยสองชนิดร่วมกันเพิ่มประสิทธิภาพในการช่วยลดการหดตัวทั้งแบบแห้งและแบบพลาสติกได้ดีกว่าการเส้นใยเดี่ยว



ภาพที่ 25 การหดตัวทั้งแบบแห้งและแบบพลาสติกของคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดียวและสองชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา

#### ผลการทดสอบการขยายตัวเนื่องจากความร้อน

นำตัวอย่างหลังจากการทดสอบการหดตัวแบบอิสระของคอนกรีตแบบแห้งเรียบร้อยแล้ว ติดหมุดกึ่งกลางตัวอย่างระยะห่างกัน 10 เซนติเมตร วัดระยะห่างของหมุดโดย multi length strain gauge ที่อุณหภูมิเริ่มต้น แล้วนำเข้าสู่ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยนำตัวอย่างบ่มในทรายเพื่อควบคุมความร้อนให้สม่ำเสมอเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้ววัดความระยะห่างหมุดที่เปลี่ยนแปลงไปและอุณหภูมิหลังหลั่งออกจากตู้อบทันที ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 26 จากการทดสอบค่าการขยายตัวบางชุดตัวอย่างมีความกระจัดกระจาย ในกรณีเช่นนี้จึงใช้วิธีเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์จาก 2 ตัวอย่างที่มีค่าใกล้เคียงกัน ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตปกติเท่ากับ  $11 \times 10^{-6} - 20 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  (Neville, 1999) ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างทั้งคอนกรีตล้วนและคอนกรีตผสมเส้นใยมีค่าสัมประสิทธิ์ค่อนข้างใกล้เคียง และใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ



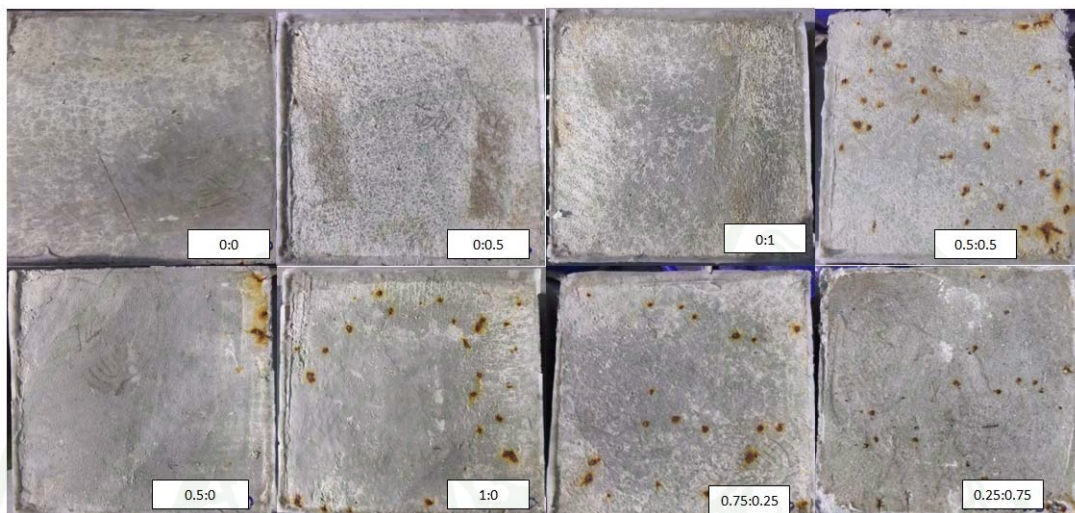
ภาพที่ 26 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเดี่ยวและสองชนิด

#### ผลการทดสอบความสามารถการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์

จากการทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านจากผิวหน้าของคอนกรีตใน 2 สถานะคือ สถานะที่คอนกรีตอิมมัวจากคลอไรด์ตลอดเวลาและอยู่ในสถานะเปียกสลับแห้ง โดยมีสภาพเปียก 8 ชั่วโมง และสภาพแห้ง 40 ชั่วโมง เป็นเวลา 90 วัน คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็กเกิดสนิมแบบจุดบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตที่สามารถเห็นได้ชัดในช่วงเวลา 15-20 วัน

จากภาพที่ 27 และภาพที่ 28 จะสังเกตเห็นว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็กเท่านั้นที่จะเกิดสนิมแบบจุด กระจายอยู่บริเวณหน้าตัดที่สัมผัสกับคลอไรด์ โดยตัวอย่างที่อยู่ในสถานะเปียกสลับแห้ง จะมีความรุนแรงมากกว่าและเกิดจุดสนิมเร็วกว่าตัวอย่างที่อยู่ในสถานะอิมมัวตลอดเวลา ดังตารางผนวกที่ ข6 จากการทดสอบค่าความเป็นด่างของคอนกรีตของทั้งสองสถานะมีค่าใกล้เคียงกันเฉลี่ย pH เท่ากับ 12.64 แสดงว่าคอนกรีตยังมีความเป็นด่างเพียงพอที่จะปกป้องเส้นใยเหล็กไม่ให้เกิดสนิม แต่สนิมที่เกิดขึ้นในคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กเนื่องมาจากการผสมเส้นใยในคอนกรีตมีลักษณะการกระจายตัวแบบสุ่ม ทำให้ระยะหุ้มคอนกรีตของเส้นใยบางส่วนที่อยู่ชิดกับ

บริเวณผิวคอนกรีตไม่เพียงพอ จึงทำให้เส้นใยเหล็กสัมผัสกับคลอไรด์โดยตรง โดยที่ตัวอย่างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งเกิดเร็วกว่าอยู่ในสภาวะอิมมัวตลอดเวลา



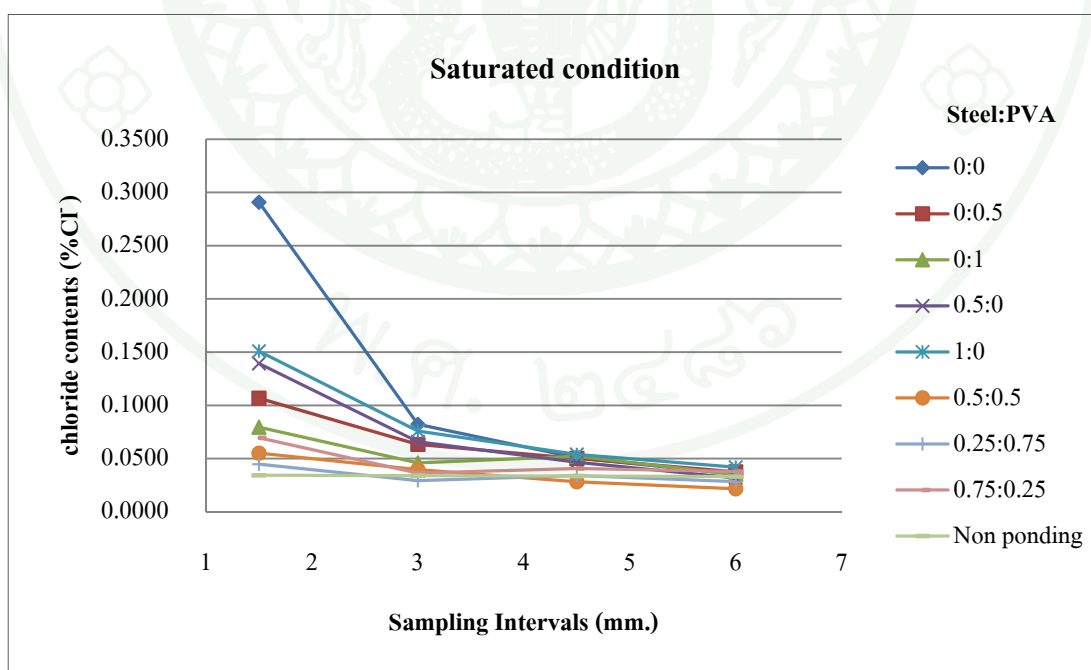
ภาพที่ 27 การเกิดสนิมเป็นจุดบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตตัวอย่างในสภาวะเปียกสลับแห้ง



ภาพที่ 28 การเกิดสนิมเป็นจุดบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตตัวอย่างในสภาวะอิมมัวจากคลอไรด์ตลอดเวลา

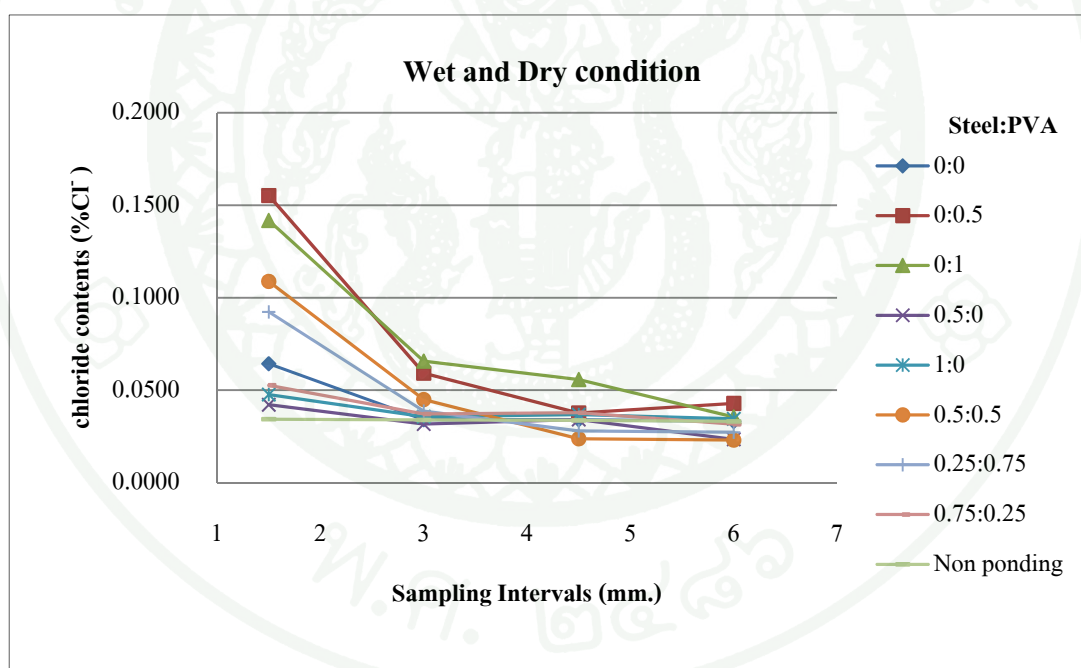
จากภาพที่ 29 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆจากผิวคอนกรีตของตัวอย่างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวตลอดเวลา แนวโน้มของปริมาณคลอไรด์ไอออนลดน้อยลงเมื่ออยู่ลึกจากผิวของคอนกรีต ความลึกจากผิวคอนกรีต 10-20 มิลลิเมตรของทุกตัวอย่างเป็นบริเวณที่มีปริมาณคลอไรด์สูงสุด คอนกรีตธรรมดาที่บริเวณความลึกนี้มีปริมาณคลอไรด์ไอออนสูงที่สุดคือ 0.291% โดยน้ำหนักคอนกรีต เมื่อผสมเส้นใยทั้งเส้นใยเหล็กและเส้นใย PVA ปริมาณคลอไรด์ลดอย่างเห็นได้ชัด โดยที่แนวโน้มการใช้เส้นใย PVA ส่งผลต่อการลดปริมาณคลอไรด์ได้มากกว่าการใช้เส้นใยเหล็ก โดยคอนกรีตผสมเส้นใย PVA 0.5% และ 1.0% มีปริมาณคลอไรด์ 0.101% และ 0.080% โดยน้ำหนักคอนกรีต ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 0.5% และ 1.0% ที่มีปริมาณคลอไรด์ 0.139% และ 0.151% โดยน้ำหนักคอนกรีต ตามลำดับ

ในขณะที่เดียวกันการผสมเส้นใยแบบสองประสานทั้ง 3 อัตราส่วนช่วยลดปริมาณคลอไรด์ได้ดีกว่าผสมเส้นใยชนิดเดียว อัตราส่วนเส้นใยเหล็กต่อ PVA 0.25:0.75 มีปริมาณคลอไรด์ 0.045% โดยน้ำหนักคอนกรีต น้อยกว่าคอนกรีตล้วนถึง 84.54% ซึ่งการลดปริมาณคลอไรด์แสดงให้เห็นว่าช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตยังมีปริมาณคลอไรด์น้อยยังต้านทานการซึมผ่านได้ดี



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นคลอไรด์กับความลึกจากผิวของคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเดี่ยวและสองชนิด ในสภาวะอิ่มตัวตลอดเวลา

จากภาพที่ 30 ผลการทดสอบเมื่อตัวอย่างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง คอนกรีตผสมเส้นใยPVA ทั้ง 0.5% และ1% มีปริมาณคลอไรด์ที่ความลึก 10-20 มิลลิเมตรจากผิวคอนกรีตเท่ากับ 0.155% และ 0.142% โดยน้ำหนักคอนกรีต ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าปริมาณคลอไรด์ของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กในค่าเดียวกัน ถึงแม้ว่าในช่วงแรกมีปริมาณคลอไรด์ของ PVA 1% จะต่ำกว่า PVA 0.5% แต่คลอไรด์สามารถเจาะคอนกรีต PVA 1.0% ลงไปได้ลึกกว่า PVA 0.5% แสดงให้เห็นว่าปริมาณเส้นใย PVA ยิ่งมากยิ่งทำให้คลอไรด์ซึมผ่านไปได้มาก ส่วนการใช้เส้นใยสองชนิดร่วมกันซึ่งที่มีปริมาณเส้นใย PVA มากกว่าหรือเท่ากับเส้นใยเหล็ก ทำให้ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ลดลง ดังในตัวอย่างอัตราส่วนเส้นใยเหล็กต่อเส้นใยPVA เท่ากับ 0.5:0.5 และ 0.25:0.75 มีปริมาณคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตธรรมดา 69.21% และ 43.55% แต่ในขณะเดียวกันเส้นใยเหล็กยังสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นคลอไรด์กับความลึกจากผิวของคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเดี่ยวและสองชนิด ในสภาวะเปียกสลับแห้ง

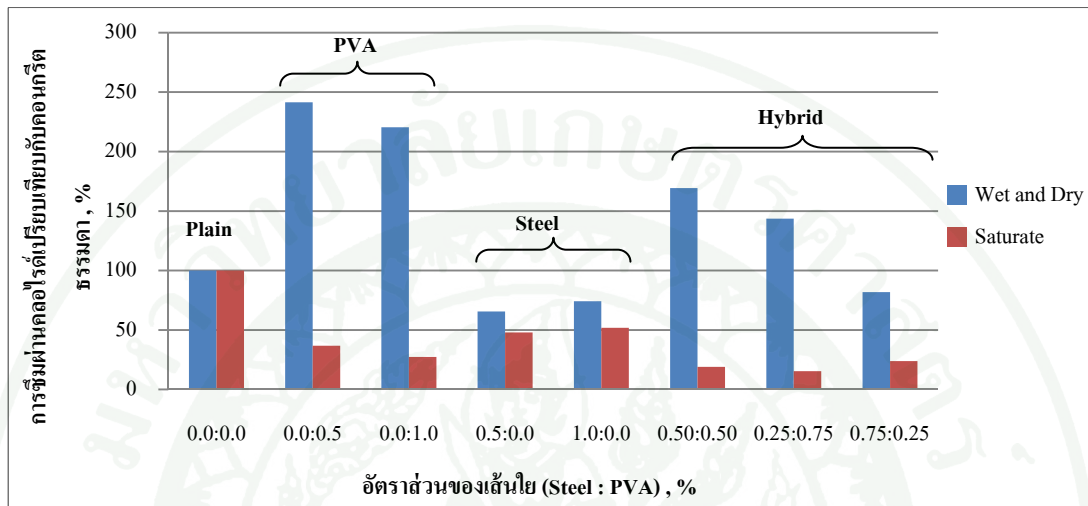
ความลึกที่คลอไรด์สามารถซึมผ่านตัวอย่างคอนกรีต สังกเกตได้จากความแตกต่างปริมาณคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะอิมมัวตลอคเวลาและสภาวะเปียกสลับแห้งเปรียบเทียบกับคอนกรีตล้วนอยู่ในสภาวะธรรมชาติที่ไม่ได้ทำการแช่แข็งด้วยคลอไรด์ ซึ่งถ้ามีปริมาณคลอไรด์สูงกว่าในสภาวะธรรมชาติแสดงว่าคลอไรด์ซึมผ่านไปถึงความลึกนั้นแล้ว แต่เนื่องจากในส่วนผสมแต่ละชุดอาจมีปริมาณคลอไรด์เดิมที่ไม่เท่ากันอยู่แล้วจึงเพื่อค่าคลาดเคลื่อน $\pm 0.005\%$  โดยน้ำหนักคอนกรีต

จากภาพที่ 29 และ 30 ตัวอย่างคอนกรีตผสมเส้นใย PVA ทั้ง 0.5% และ 1% ร่วมไปถึงตัวอย่าง 0.5:0.5 ในสภาวะเปียกสลับแห้งคลอไรด์ซึมผ่านไปถึงความลึกจากผิวที่ 40-50 มิลลิเมตร โดยที่ตัวอย่างคอนกรีตล้วน คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก และผสมเส้นใยสองชนิดอัตราส่วน 0.25:0.75 และ 0.75:0.25 คลอไรด์ซึมผ่านไปถึงความลึกจากผิวที่ 10-20 มิลลิเมตร ส่วนของตัวอย่างที่อยู่ในสภาวะอิมมัวตลอคเวลาตัวอย่างคอนกรีตล้วน คอนกรีตผสมแบบเดียวทั้งเส้นใยเหล็กและ PVA คลอไรด์ซึมผ่านไปถึงความลึกจากผิวที่ 40-50 มิลลิเมตร ในขณะที่คอนกรีตผสมเส้นใยแบบสองชนิด คลอไรด์ซึมผ่านไปถึงความลึกจากผิวที่ 10-20 มิลลิเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลความปริมาณเข้มข้นคลอไรด์ของทั้งสองสภาวะ

จากการทดสอบการแช่แข็งด้วยคลอไรด์ เนื่องจากระยะเวลาการทดสอบสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยที่ให้เปียก 8 ชั่วโมงและแห้ง 40 ชั่วโมง ทำให้ตัวอย่างสภาวะเปียกสลับแห้งมีระยะเวลาสัมผัสคลอไรด์น้อยกว่าสภาวะอิมมัวตลอคเวลา จึงเป็นผลให้ปริมาณความเข้มข้นคลอไรด์ของตัวอย่างในสภาวะเปียกสลับแห้งน้อยกว่าสภาวะอิมมัวตลอคเวลา ซึ่งขัดแย้งกับกลไกการเคลื่อนที่ของไอออนคลอไรด์ภายในคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งจะส่งผลกระทบต่อ การซึมผ่านของคลอไรด์รุนแรงกว่าสภาวะอิมมัวตลอคเวลา จากการทดสอบความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตในงานวิจัยนี้ เมื่อดูแนวโน้มในระยะสั้นคือ 90 วัน ผลกระทบที่เกิดขึ้นจึงอาจแตกต่างจากทดสอบระยะยาว แต่สามารถบ่งชี้ได้ว่า เส้นใย PVA มีนัยสำคัญในการนำไปใช้ในสภาวะที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 31 ผลการทดสอบในสภาวะอิมมัวตลอคเวลาเส้นใย PVA สามารถช่วยเพิ่มความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ได้ดีกว่าเส้นใยเหล็ก และไม่เกิดสนิม แต่เมื่ออยู่สภาวะเปียกสลับแห้งการใช้เส้นใย PVA กลับส่งผลกระทบทำให้คลอไรด์ซึมผ่านได้มากกว่าคอนกรีตล้วน เนื่องจากเส้นใย PVA มีลักษณะเป็นเส้นเล็กๆ มีคุณสมบัติเป็น hydrophilic (Etuo *et al.*, 2008) เมื่อสัมผัสน้ำอาจดู

ชื้นน้ำและเกิดการพันธะเคมีบางอย่างบริเวณผิว แต่อาจเป็นพันธะที่ไม่แข็งแรง เมื่อแห้งก็เกิดการหดตัว เมื่ออยู่ในสภาวะอิมมัวตลอดเวลา เส้นใยจึงอิมมัวเต็มช่องว่าง แต่เมื่ออยู่ในสภาวะเปียกกลับแห้งจึงเกิดช่องว่างเล็กๆ บริเวณ ITZ

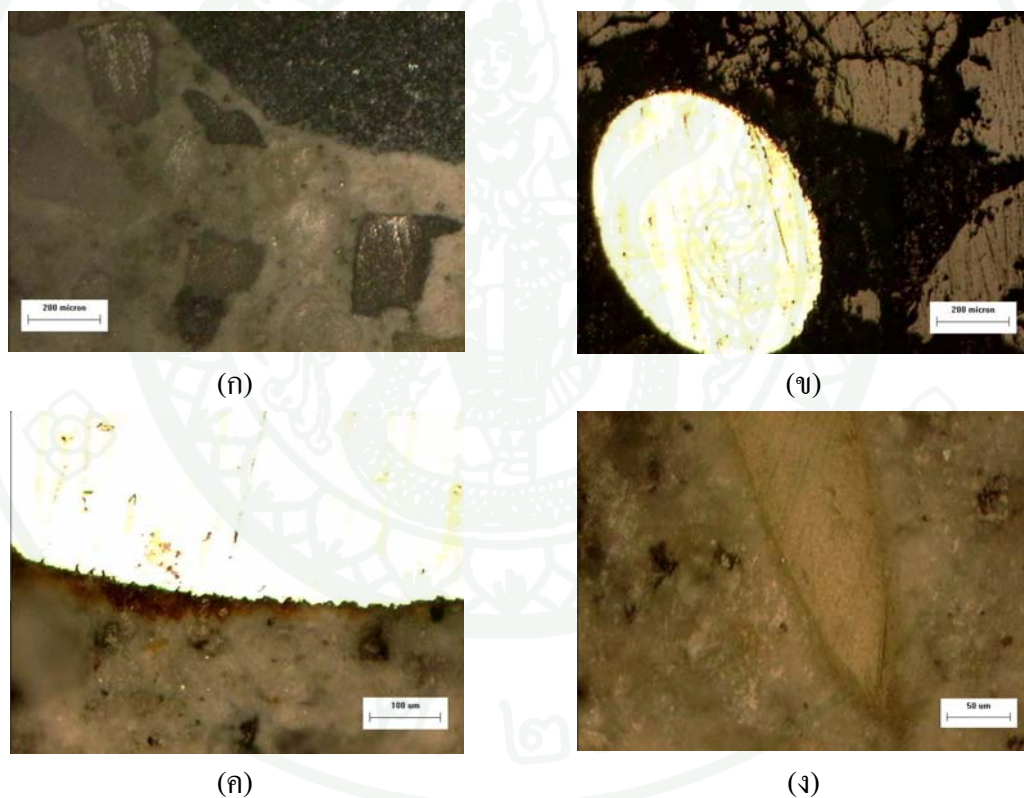


ภาพที่ 31 การซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดียวและสองชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา

### Interfacial Transition Zone

ITZ อยู่บริเวณรอยต่อของซีเมนต์เพสต์และวัสดุผสม ซึ่งเป็นจุดอ่อนของคอนกรีต เนื่องจากมีคุณสมบัติแตกต่างและมีความพรุนมากกว่าซีเมนต์เพสต์บริเวณอื่น ในคอนกรีตมี ITZ จำนวนมาก เมื่อมีแรงกระทำหรือแม้แต่การหดตัวของคอนกรีตจะทำให้เกิดรอยแตกที่บริเวณ ITZ ก่อน เป็นเหตุให้เพสต์สูญเสียแรงยึดเกาะระหว่างวัสดุ และส่งผลให้คอนกรีตสูญเสียความเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อกำลังและพฤติกรรมของคอนกรีตโดยตรง ITZ จึงเป็นจุดที่ต้องศึกษาลักษณะเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของคอนกรีต

จากภาพที่ 32 ภาพถ่ายโดยใช้กล้อง Optical Microscope กำลังขยายสูงสุด 200 เท่า ผลปรากฏว่า ไม่สามารถมองเห็นบริเวณรอยต่อ ITZ ได้ชัดเจนนัก และไม่สามารถระบุถึงความกว้างและลักษณะของ ITZ ได้อย่างแน่ชัด แต่จากการสังเกตการเชื่อมประสานของซีเมนต์เพสต์และเส้นใย บริเวณผิวสัมผัสของเส้นใยเหล็กมีความขรุขระจึงอาจมีผลต่อการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยว แต่ยังมีการแบ่งชั้นของสองวัสดุอย่างเห็นได้ชัด ส่วนเส้นใย PVA จากการสังเกตบริเวณผิวสัมผัสเชื่อมประสานกับซีเมนต์เพสต์ที่มีลักษณะค่อนข้างเรียบซึ่งน่าจะเกิดจากปฏิกิริยาบางอย่างที่เคยมีนักวิจัยรายงานไว้ (Singh and Sarita, 2001) เนื่องจากเส้นใย PVA คุณสมบัติเป็น hydrophilic เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อวัสดุของคอนกรีตล้วนซึ่งมีแต่วัสดุเปราะ การผสมเส้นใยจึงอาจมีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลและคงทนที่ชัดเจนกว่าดังผลการทดสอบที่รายงานมาแล้ว



ภาพที่ 32 ภาพถ่ายโดยกล้อง Optical Microscope ของ (ก)คอนกรีตธรรมดา, (ข), (ค) คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก, (ง) คอนกรีตผสมเส้นใย PVA

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

จากการศึกษาคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยชนิดเดี่ยวและสองชนิด เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติและพฤติกรรมการรับแรงอัดและแรงดัด การหัดตัวทั้งแบบแห้งและแบบพลาสติก การขยายตัวเนื่องจากความร้อนและความคงทนในด้านของความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ สรุปได้ดังนี้

1. เส้นใยมีผลต่อความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต ปริมาณเส้นใยมากเกินไปทำให้ความสามารถเทได้ต่ำอัดแน่นได้ยาก เนื่องจากการขัดกันทางกลของเส้นใย โดยที่เส้นใย PVA ส่งผลกระทบบวกมากกว่าเส้นใยเหล็ก จากการทดสอบโดยใช้ส่วนผสมเดียวกัน คอนกรีตล้วนมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 23 เซนติเมตร ผสมเส้นใย 1.0% ค่ายุบลดลงไปเหลือ 20 เซนติเมตร และเมื่อผสมเส้นใย PVA 1.0% ค่ายุบลดลงไปเหลือเพียง 3 เซนติเมตร
2. การผสมเส้นใยลงในคอนกรีตไม่ได้มีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดโดยตรง แต่ช่วยให้คอนกรีตไม่เกิดการวิบัติโดยเฉียบพลันหลังจากรับกำลังสูงสุด แต่ถ้าใช้เส้นใยในปริมาณมากเกินไปผลทำให้กำลังอัดลดลง เนื่องจากปริมาณเส้นใยสูงมีผลทำให้ความสามารถในการเทได้ต่ำ ดังเช่นคอนกรีตผสมเส้นใย PVA 1.0% ซึ่งรับกำลังแรงอัดได้น้อยที่สุด เนื่องจากการยุบตัวน้อยที่สุด ทำให้อัดแน่นได้ยาก เป็นผลให้คอนกรีตมีความพรุนสูง
3. การรับกำลังแรงดัดก่อนเกิดรอยร้าวแรกในคอนกรีตผสมเส้นใยไม่แตกต่างจากคอนกรีตล้วนมากนัก แต่เส้นใยจะทำงานหลังจากการเกิดรอยร้าวแรก ช่วยยึดรั้งคอนกรีตทำให้สามารถรับกำลังต่อไปได้และไม่เกิดการวิบัติอย่างเฉียบพลัน ในกรณีของการผสมเส้นใย ถ้ามีปริมาณมากเพียงพอจะช่วยให้คอนกรีตรับกำลังแรงดัดได้สูงกว่ากำลังดัดที่จุดแตกร้าวแรก ดังเช่นคอนกรีตผสมเส้นใย 0.5% มีพฤติกรรมเป็น Deflection Softening เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น 1.0% ทำให้เปลี่ยนพฤติกรรมเป็น Deflection Hardening

4. คอนกรีตผสมเส้นใยแบบสองประสาน ช่วยให้คอนกรีตมีพฤติกรรมเป็น Deflection Hardening ดังเช่น คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กต่อเส้นใย PVA 0.25:0.75 แม้มีปริมาณเส้นใยเหล็กเพียง 0.25% เมื่อใช้ร่วมกับเส้นใย PVA 0.75% ทำให้ตัวอย่างคอนกรีตมีพฤติกรรมเป็น Deflection Hardening ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเส้นใย PVA 1.0% ถึงแม้มีปริมาณเส้นใยรวม 1.0% แต่มีพฤติกรรมเป็น Deflection Softening

5. เส้นใยPVAmiพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเนื้อคอนกรีตสูงกว่าเส้นใยเหล็ก แต่มีความสามารถในการรับกำลังน้อยกว่า เมื่อรับกำลังตัดสูงสุดจึงเส้นใยจึงฉีกขาดทำให้คอนกรีตผสมเส้นใยPVAรับกำลังแรงคัดและการโก่งตัวได้น้อยกว่าเส้นใยเหล็ก ส่วนเส้นใยเหล็ก แรงยึดเหนี่ยวที่ผิวสัมผัสน้อยกว่าแต่มีกำลังรับสูงกว่า เมื่อรับแรงคัดสูงสุดเส้นใยจะหลุดออกจากเนื้อคอนกรีตจึงทำให้รับการโก่งตัวได้สูงกว่าเส้นใยPVA

6. คอนกรีตผสมเส้นใยช่วยการลดการหดตัวทั้งแบบแห้งและแบบพลาสติกได้ดี โดยที่เส้นใย PVA ช่วยลดการหดตัวได้มากกว่าเส้นใยเหล็ก การใช้เส้นสองชนิดร่วมกันช่วยการลดการหดตัวทั้งแบบแห้งและแบบพลาสติกได้มากกว่าการใช้เส้นชนิดเดียว ดังเช่นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กต่อเส้นใย PVA 0.75:0.25 แม้มีปริมาณเส้นใย PVA เพียง 0.25% เมื่อใช้ร่วมกับเส้นใยเหล็ก 0.75% ทำให้แนวโน้มการลดการหดตัวทั้งแบบแห้งและแบบพลาสติกใกล้เคียงกับคอนกรีตผสมเส้นใย PVA1.0%

7. การขยายตัวเนื่องจากความร้อนทั้งคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยมีค่าสัมประสิทธิ์ใกล้เคียงกัน

8. การซึมผ่านคลอไรด์ในสภาวะอิ่มตัวตลอดเวลา คอนกรีตผสมเส้นใยแบบสองประสาน ด้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ได้ดีกว่าผสมเส้นใยชนิดเดียว โดยที่คอนกรีตผสมเส้นใย PVA มีการซึมผ่านของคลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก แต่ในทางกลับกัน ในสภาวะเปียกสลับแห้ง ปริมาณเส้นใย PVA ยิ่งมาก การซึมผ่านของคลอไรด์ยิ่งมากตามไปด้วย

### ข้อเสนอแนะ

การใช้เส้นใยผสมในคอนกรีตสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพและในขณะเดียวกันก็อาจลดทอนความสามารถบางอย่าง ดังนั้นควรศึกษาคุณสมบัติและผลกระทบด้านต่างๆเพื่อเป็นประโยชน์ในการเลือกใช้เส้นใยให้เหมาะสมกับลักษณะความต้องการของงาน การวิจัยเพื่อการศึกษาและเก็บเป็นฐานข้อมูล ข้อเสนอแนะสิ่งที่ควรศึกษาเพิ่มจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีดังต่อไปนี้

1. การทดสอบความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตผสมเส้นใย ควรเลือกวิธีการทดสอบที่ให้คอนกรีตสามารถไหลได้อิสระ เพื่อให้เส้นใยกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ จะได้ค่าความสามารถในการเทได้ที่แม่นยำและใกล้เคียงกับลักษณะงานจริงมากยิ่งขึ้น
2. การศึกษาการหดตัวแบบแห้ง ควรศึกษาการหดตัวแบบยี่ดิ่งด้วย เนื่องจากการหดตัวที่เกิดขึ้นในโครงสร้างมีการยี่ดิ่ง เพื่อศึกษาพฤติกรรมและได้ค่าการหดตัวที่ใกล้เคียงโครงสร้างจริง
3. การศึกษา Micro Structure ของคอนกรีตมากขึ้น อาจจะโดยการถ่ายภาพ Scanning Eletron Microscopy (SEM) เพื่อศึกษาผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อม ที่เป็นปัจจัยต่อพฤติกรรมของคอนกรีต
4. ควรทดสอบผลกระทบจากคลอไรด์ที่ระยะเวลายาวนานมากขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบในระยะยาว และควรศึกษาความคงทนด้านอื่นๆเพิ่มเติม เนื่องจากคอนกรีตมีการนำไปใช้งานในสถานะที่หลากหลาย ซึ่งมีผลกระทบแตกต่างกัน

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2548. โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ Poly (vinyl alcohol) หรือ พีวีโอเอช.  
แหล่งที่มา: <http://www1.pttchem.com/library/dictionary/polyvinylalcohol/index.shtml>,  
7 กันยายน 2555.
- สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 2551. โครงการจัดการความรู้เพื่อผลประโยชน์แห่งชาติทาง  
ทะเล. แหล่งที่มา: <http://www.mascat.org/kmp/coastprov.htm>, 23 ตุลาคม 2554.
- Abdullah A.A. 2001. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars.  
**Construction and Building Materials** 15: 361-368.
- ACI Committee 544. 2002. **State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete ACI  
544.1R-96**. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Alabama Department of Transportation. 2008. **PVA Fiber Reinforced Shotcrete for  
Rehabilitation and Preventative Maintenance of Aging Culverts**. 67.
- Alexandra P., G. Moriconi and S.P. Shah. 2009. Cracking behavior of concrete with shrinkage  
reducing admixtures and PVA fibers. **Cement & Concrete Composites** 31: 699-704.
- American Society for Testing and Material. 2003. **Standard Test Method for Compressive  
Strength of Cylindrical Concrete Specimens**. ASTM C 39/C 39M – 03.
- American Society for Testing and Material. 2002. **Standard Test Method for Flexural  
Strength of Concrete**. ASTM C78-02.

American Society for Testing and Material, 1997. **Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete.** ASTM C1018-97.

Anthony L.A. 2003. **Plastics and the environment.** John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.

Balouch S.U., J.P. Forth and J.L. Granju. 2010. Surface corrosion of steel fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Research** 40: 410-414.

Banthia N. and N. Nandakumar. 2003. Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites. **Cement & Concrete Composites** 25: 3-9.

Banthia N. and M. Sappakittipakorn. 2007. Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. **Cement and Concrete Research** 37: 1366–1372.

Bekaert Inc. 2010. **Data sheet of steel fiber.** Available Source:

<http://www.bekaert.com/en/Product%20Catalog/Products/D/Dramix%20steel%20fibres%20for%20concrete%20reinforcement.aspx>, August 18, 2012.

Bensaid B., M. Hamrat , M. Chemrouk and S. Amziane. 2012. Influence of yield stress and compressive strength on direct shear behavior of steel fibre-reinforced concrete. **Construction and Building Materials** 24: 6-14.

- Bentur A., and S. Mindess. 1990. **Fiber Reinforced Cementitious Composites**. Elsevier Applied Science, London.
- Bo X., H.A. Toutanji and J. Gilbert. 2010. Impact resistance of poly(vinyl alcohol) fiber reinforced high-performance organic aggregate cementitious material. **Cement and Concrete Research** 40: 347-351.
- Etuo S., T. Horiike and T. Takahashi. 2008. Study on the Applicability of short Fiber Reinforced Concrete to Precast Concrete Slab for Slab Track. **Quarterly Report of RTRI** 49 (1): 40-46.
- Hansen T.C. 1968. Cracking and fracture of concrete and cement paste sym on cause mechanism and control of cracking in concrete. **American Concrete Institute Special Publication** 20: 5-28.
- Hermite R.G.L. 1960. Volume changes of concrete, pp. 659-694. *In* **Proceeding 4<sup>th</sup> International Symposium on the Chemistry of Cement**, Washington D.C.
- Homayoon S.P., E. Ganjian, P. Claisse and K. Muthuramalingam. 2013. Corrosion durability of high performance steel fibre reinforced concrete, pp. 246-254. *In* **3<sup>rd</sup> International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies**. August 18- August 21 2013, Kyoto Research Park, Kyoto, Japan.
- Horikoshi T., A. Ogawa, T. Saito and H. Hoshiro. 2006. Properties of Polyvinylalcohol Fiber as Reinforcing Materials for Cementitious Composites, pp.145-153. *In* G. Fischer and V. C. Li., eds. **International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications**. RILEM Publications SARL.

- Jacek K. 2006. Steel Fibers and Steel Fiber Reinforced Concrete in Civil Engineering. **The Pacific Journal of Science and Technology** 7: 53-58.
- Jean L.G. and S.U. Balouch. 2005. **Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks**. Cement and Concrete Research 35: 572-577.
- Kosa K. and A.E. Naaman. 1990. Corrosion of Steel Fiber Reinforced Concrete. **ACI Materials Journal** 87: 27-37.
- Kuraray America Inc. 2012. **PVA Fiber & Industrial Materials**. Available Source: <http://www.kuraray-am.com/pvaf/safety.php>, September 7, 2012.
- Laetitia M., P. Rossi and N. Roussel. 2010. Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction. **Cement & Concrete Composites** 40: 226-234.
- Li Y. and H. Shuguang. 2001. The microstructure of the interfacial transition zone between steel and cement paste. **Cement and Concrete Research** 31: 385-388.
- Nemkumar B. and R. Gupta. 2006. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. Cement and Concrete Research 36: 1263-1267.
- Neville A.M. 1999. **Properties of Concrete. Longman 4th Edition**. Monotype Times, Malaysia.
- Nicola B., C. Mazzotti and M. Savoia. 2011. Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes. **Construction and Building Materials** 25: 2713-2722.
- Olivito R.S. and F.A. Zuccarello. 2010. An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete. **Composite** 41: 246-255.

- Sameer H., T.A. Lebdeh and T. Cummins. 2010. Deflection behavior of concrete beams reinforced with PVA micro-fibers. **Construction and Building Materials** 24: 2285-2293
- Seong C.L., J.Y. Cho, and F.J. Vecchio. 2013. Tension-Stiffening Model for Steel Fiber-Reinforced Concrete Containing Conventional Reinforcement, pp.. **ACI Structural Journal**. 2013 (111): 639-648.
- Serkan T., C. Dundar and A. K. Tanrikulu. 2012. Experimental behaviour of steel fiber high strength reinforced concrete and composite columns. **Journal of Constructional Steel Research** 74: 98-107.
- Seung H.P, D.J. Kim, G.S. Ryu and K.T. Koh. 2012. Tensile behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete. **Cement & Concrete Composites** 34: 172-184.
- Shaikh F.U.A., M. Maalej and P. Paramasivam. 2007. Flexural responses of hybrid steel-polyethylene fiber reinforced cement composites containing high volume fly ash. **Construction and Building Materials** 21: 1088-1097.
- Sika (Thailand) Ltd. 2008. **Product Data Sheet**. Available Source:  
file:///C:/Users/user/Downloads/Sika%20PDS\_T\_Sikament%20FF.pdf, February 11, 2008.
- Singh N.B. and Sarita R. 2001. Effect of polyvinyl alcohol on the hydration of cement with rice husk ash. **Cement and Concrete Research** 31. 239-243

- Sivakumar A. and M. Santhanam. 2007. A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete. . **Cement & Concrete Composites** 29: 575-581.
- Song P.S., S. Hwang and B.C. Sheu. 2005. Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes. **Cement and Concrete Research** 35: 1546-1550.
- Toutanji H., S. McNeil and Z. Bayasi. 1998. Chloride Permeability and Impact Resistance of Polypropylene-Fiber-Reinforced Silica Fume Concrete. . **Cement and Concrete Research** 28. 961-968.
- Twintec (Thailand) Ltd. 2014. **Project Spotlights**. Available Source: <http://www.twintec.co.uk/clients-and-projects/project.php?articleid=98>, April 8, 2014.
- Vladimír M., L. Lapcak, L. Borecka and M. Lhotka. 2013. Microstructure of interfacial transition zone between pet fibres and cement paste. **Acta Geodyn. Geomater** 10. 121-127
- Wei S., H. Chen, X. L. and H. Qian. 2001. The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research** 31: 595-601.
- Zimbelmann R. 1985. A contribution to the problem of cement-aggregate bond. **Cement and Concrete Research** 15: 801-808.



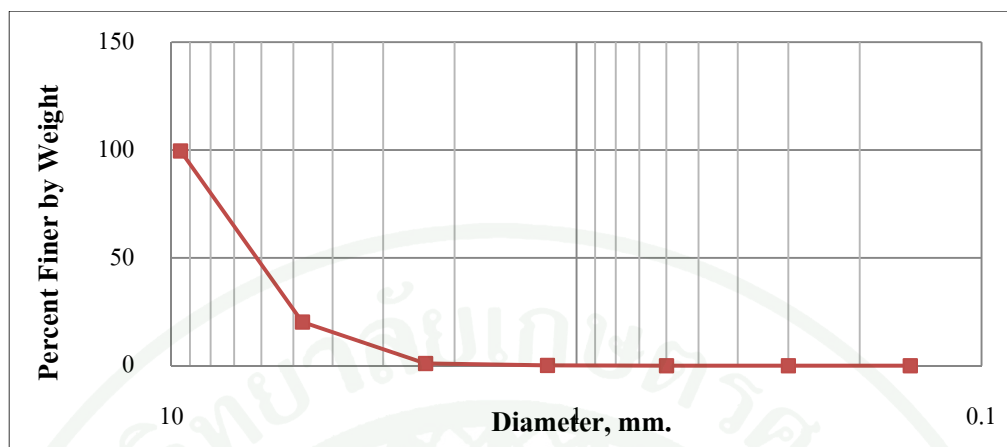
ภาคผนวก



การทดสอบหาขนาดกะของมวลรวมทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C136 และมีผลการทดลองดังแสดงในตารางผนวกที่ ก1, ก2 และภาพผนวกที่ ก1 ดังนี้

ตารางผนวกที่ ก1 ขนาดกะของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษา

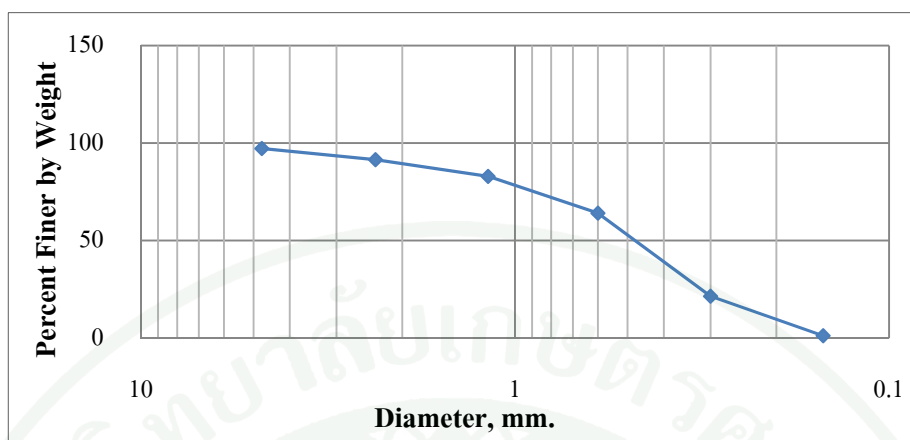
Dry Weight of Original Sample		1000 g.					
Sieve No.	Sieve Opening, (mm.)	Wt. of Sieve, (g.)	Wt. of Sieve + Sample, (g.)	Wt. of Sam. Retained, (g.)	% Retained	% Cumulative	% Finer
3/8"	9.50	727.59	731.47	3.88	0.39	0.39	99.61
4	4.75	563.90	1360.62	796.72	79.72	79.72	20.28
8	2.36	520.30	712.37	192.10	19.22	98.94	1.06
16	1.18	610.92	619.78	8.86	0.89	99.83	0.17
30	0.60	450.03	451.15	1.12	0.11	99.94	0.06
50	0.30	430.81	430.89	0.08	0.01	99.95	0.05
100	0.15	364.40	364.61	0.21	0.02	99.97	0.03
Pan	0.00	337.80	338.15	0.33	0.03	-	-
Total				999.42	100.00	578.72	
Error (Original Wt.-Total Wt.Retained) =				0.58			
% Error =				0.06	%		
Fineness Modulus =				5.79			



ภาพผนวกที่ ก1 ขนาดละเอียดของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษา

ตารางผนวกที่ ก2 ขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษา

Dry Weight of Original Sample		500		g.			
Sieve No.	Sieve Opening, (mm.)	Wt. of Sieve, (g.)	Wt. of Sieve + Sample, (g.)	Wt. of Sam. Retained, (g.)	% Retained	% Cumulative	% Finer
4	4.75	564.00	577.97	13.97	2.80	2.80	97.20
8	2.36	520.20	548.84	28.61	5.73	8.53	91.48
16	1.18	610.84	653.62	42.78	8.57	17.09	82.91
30	0.60	449.99	544.17	94.18	18.86	35.95	64.05
50	0.30	430.30	643.07	212.77	42.60	78.54	21.46
100	0.15	363.99	465.10	101.11	20.24	98.79	1.22
Pan	0.00	337.80	343.85	6.07	1.22	-	-
Total				499.49	100.00	241.68	
Error (Original Wt.-Total Wt.Retained) =				0.51			
% Error =				0.10	%		
Fineness Modulus =				2.42			



ภาพผนวกที่ ก2 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษา

การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมจะแบ่งออกเป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด โดยมวลรวมหยาบจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C127 ส่วนมวลรวมละเอียดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C128 ได้ผลการทดลองดังแสดงในตาราง ดังนี้

ตารางผนวกที่ ก3 ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษา

รายละเอียด	ค่าที่วัดได้
Weight of Satural Surface Dry Sample, B (g.)	2500.00
Weight of Container(Basket) in Water, (g.)	2913.08
Weight of Container + Sample in Water (g.)	4464.92
Weight of Sample in Water, C (g.)	1551.84
Weight of Oven-Dry Sample in Air, A (g.)	2487.02
Bulk Specific Gravity (Oven-Dry)	2.62
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.64
Apparent Specific Gravity	2.66
Absorption (%)	0.52

**ตารางผนวกที่ ก4** ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษา

รายละเอียด	ค่าที่วัดได้
Weight of Satural Surface Dry Sand, S (g.)	500.00
Weight of Glass Graduate + Water, B (g.)	694.59
Weight of Water + Sand + Glass Graduate, C (g.)	1002.01
Weight of Oven-Dry Sand, A (g.)	496.58
Bulk Specific Gravity (Oven-Dry)	2.58
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.60
Apparent Specific Gravity	2.63
Absorption (%)	0.69

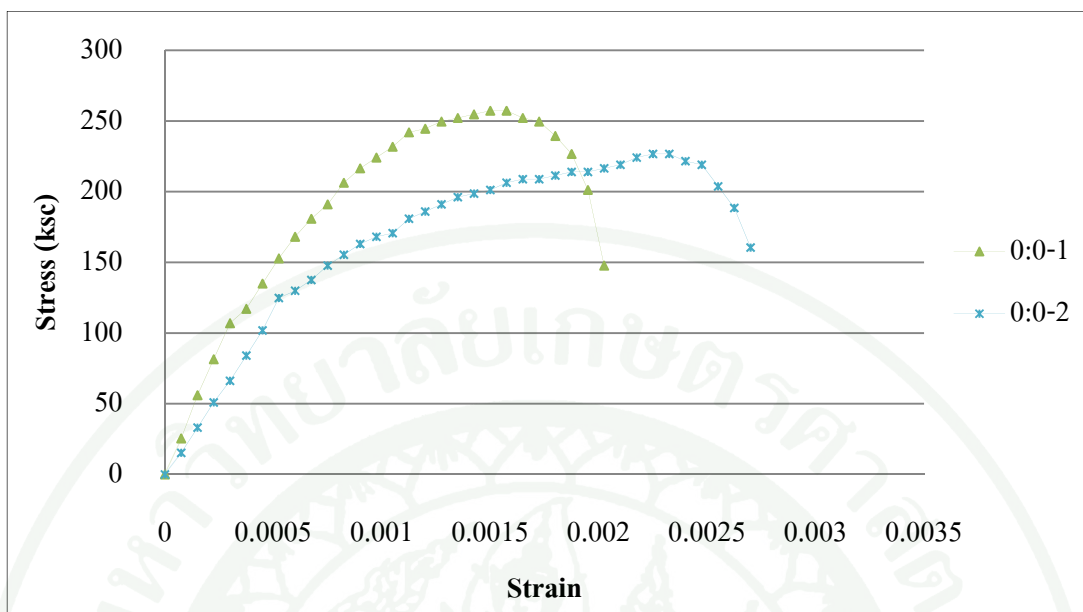
**ตารางผนวกที่ ก5** น้ำหนักจำเพาะของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษา

Temperature of Water (°C) = 28 °C

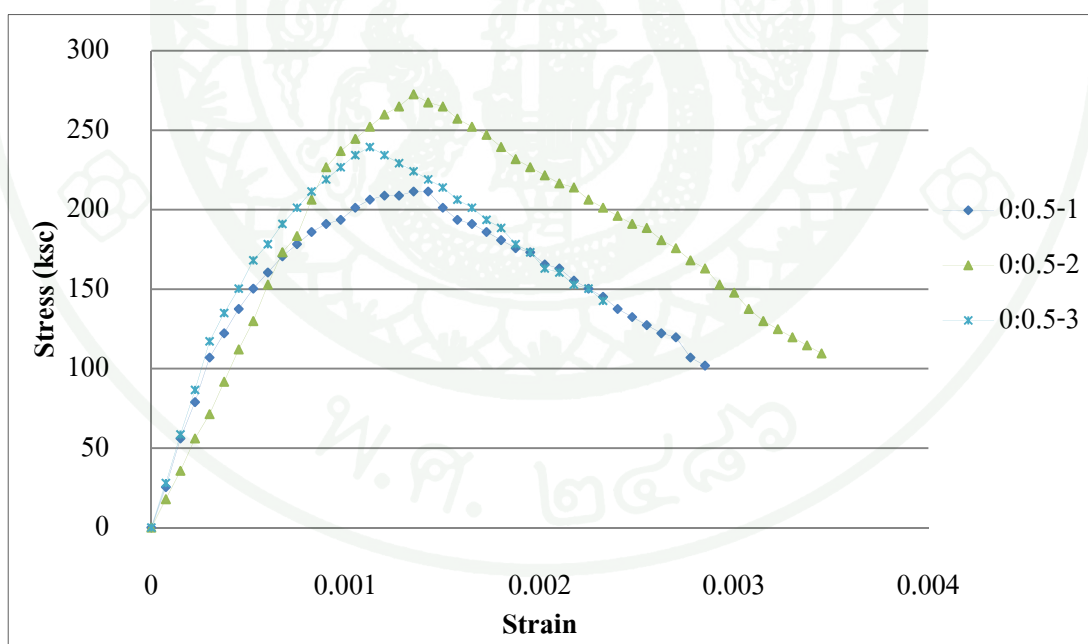
Weight of Water (kg./m<sup>3</sup>) = 996.22 kg./m<sup>3</sup>

Determination	Stone	Sand
Weight of Measuring Cylinder, T (kg.)	8.745	4.668
Weight of Measuring Cylinder + Water (kg.)	15.739	7.430
Weight of Water (kg.)	6.994	2.762
Volume of Measuring Cylinder, V (m <sup>3</sup> )	0.0070	0.0028
Weight of Cylinder + Sample, G (kg.)	18.928	8.941
Weight of Sample Alone (kg.)	10.183	4.273
Unit Weight of Sample, M (kg./m <sup>3</sup> )	1450.46	1541.22
Unit Weight of Sample at SSD, M <sub>ssd</sub> (kg./m <sup>3</sup> )	1458.00	1551.85
Bulk Specific Gravity (Oven-Dry)	2.60	2.58
Percentage of Voids (%)	44.00	40.04
Absorption (%)	0.52	0.69

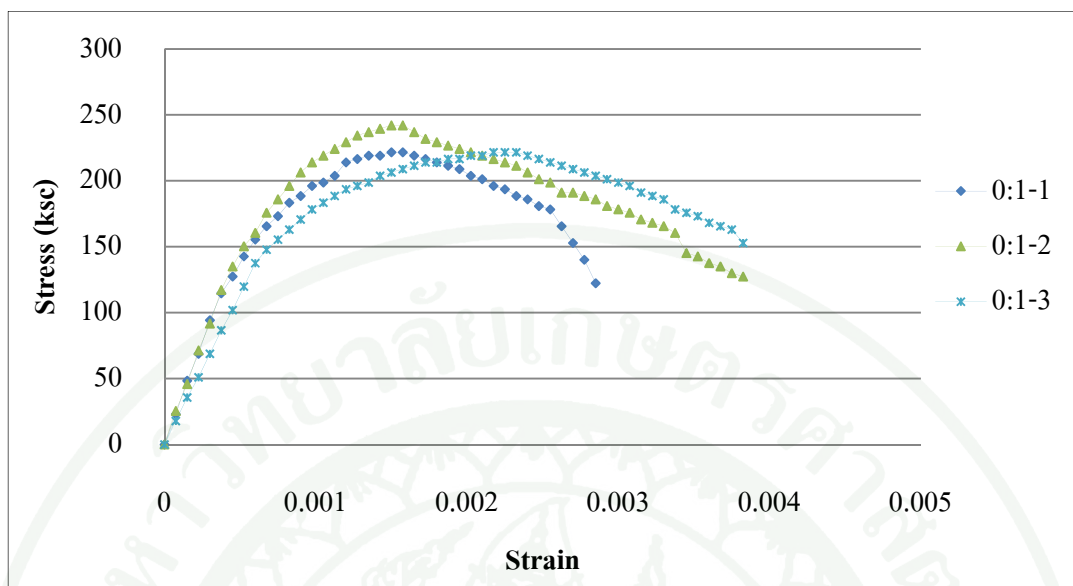




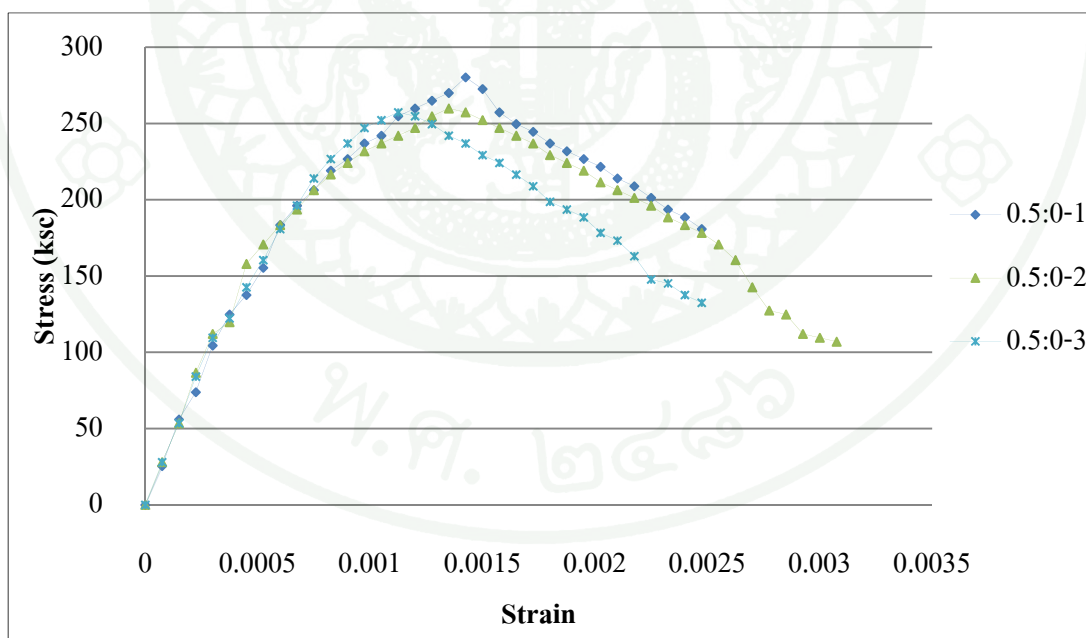
ภาพผนวกที่ ข1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตธรรมดา



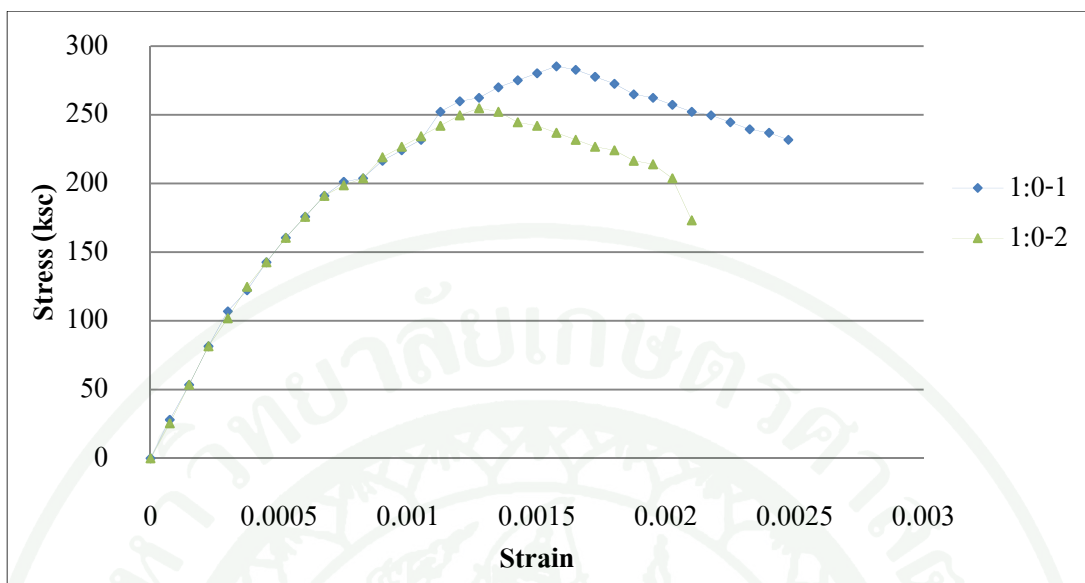
ภาพผนวกที่ ข2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใย PVA 0.5% โดยปริมาตร



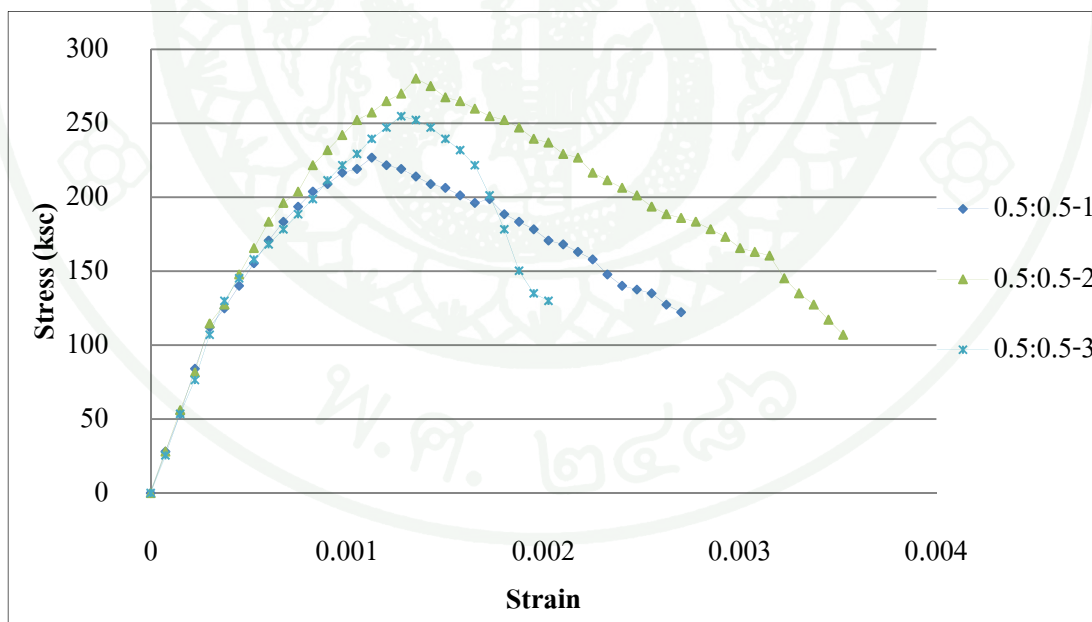
ภาพผนวกที่ ๓ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใย PVA 1.0% โดยปริมาตร



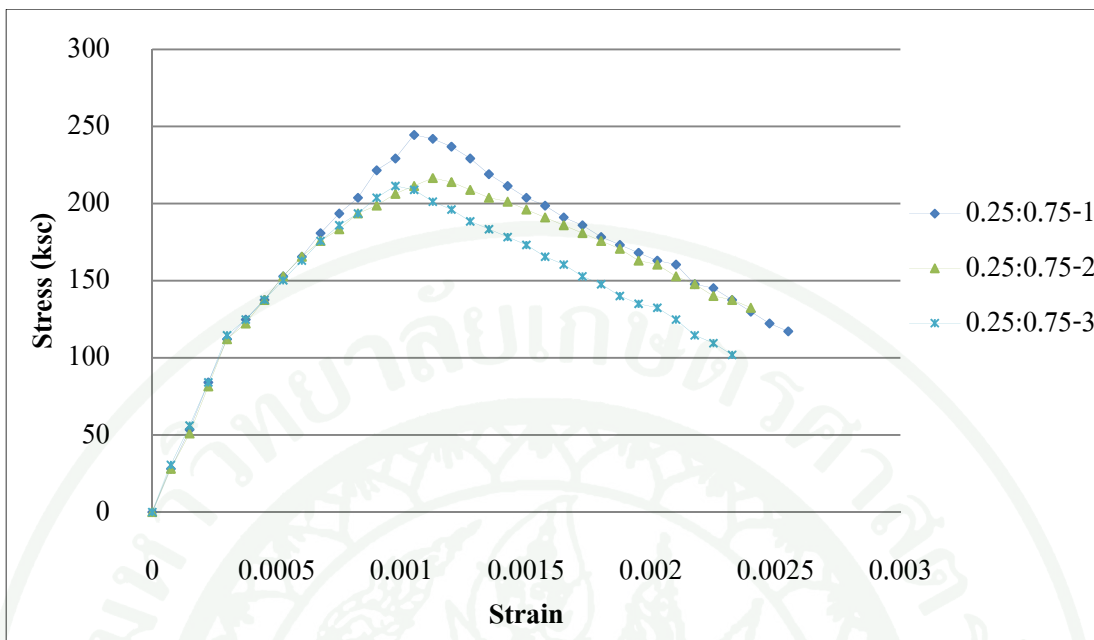
ภาพผนวกที่ ๔ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 0.5% โดยปริมาตร



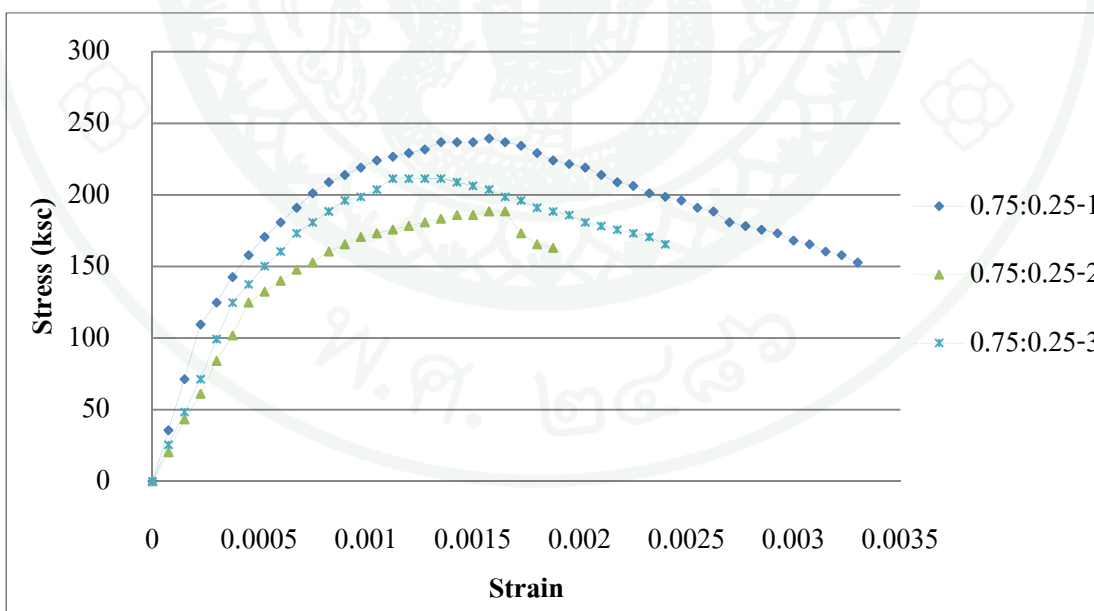
ภาพผนวกที่ ข5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 1.0% โดยปริมาตร



ภาพผนวกที่ ข6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก และPVA 0.5:0.5% โดยปริมาตร



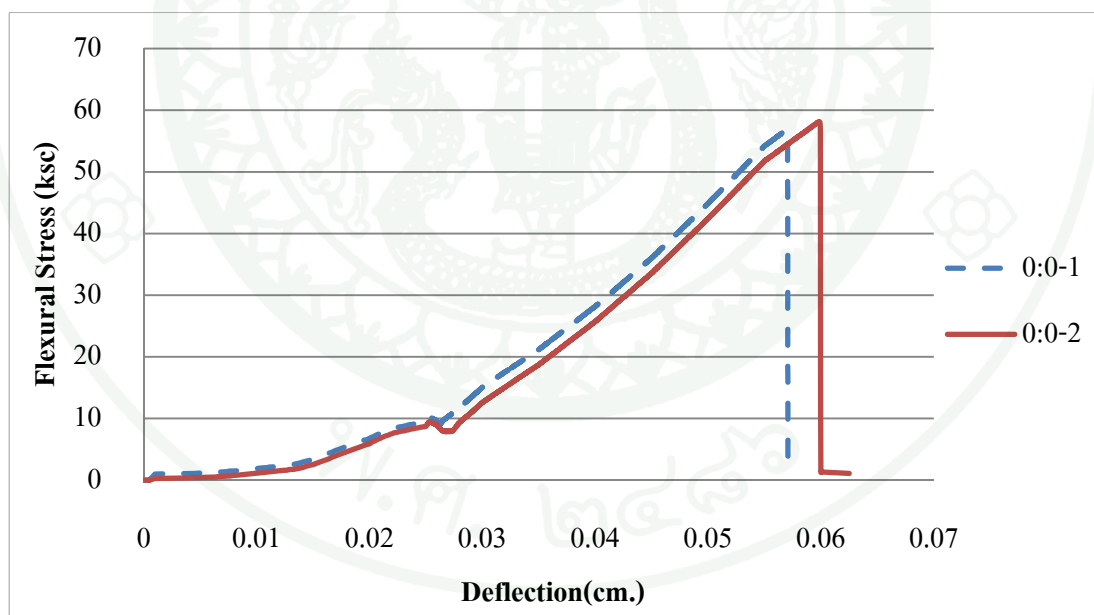
ภาพผนวกที่ ข7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก และPVA 0.25:0.75% โดยปริมาตร



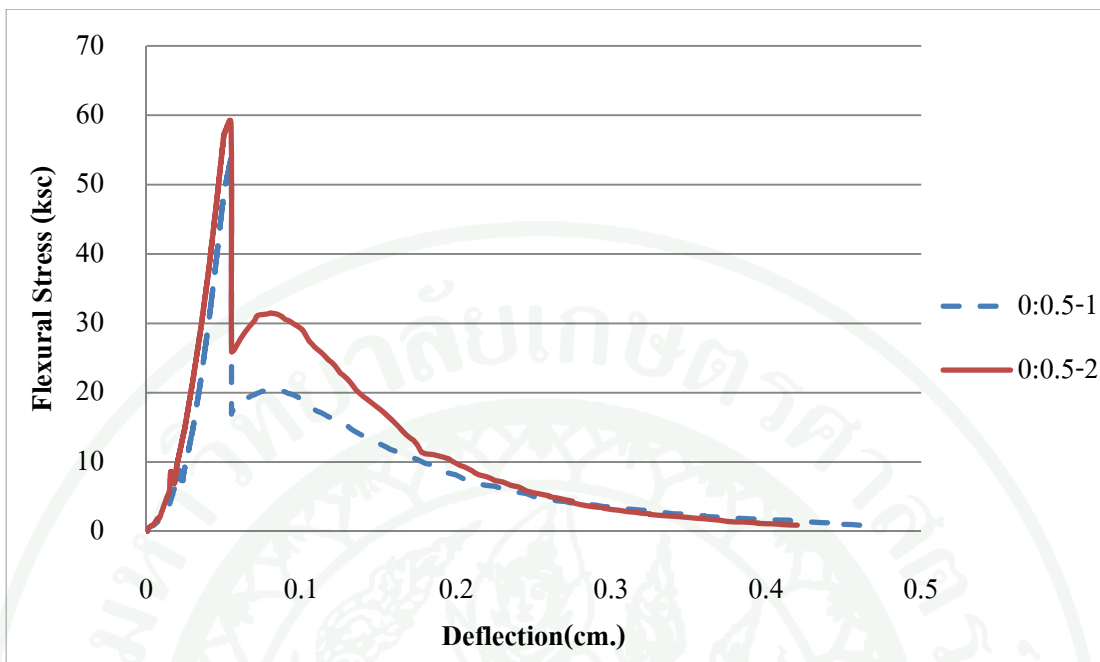
ภาพผนวกที่ ข8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก และPVA 0.75:0.25% โดยปริมาตร

ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด

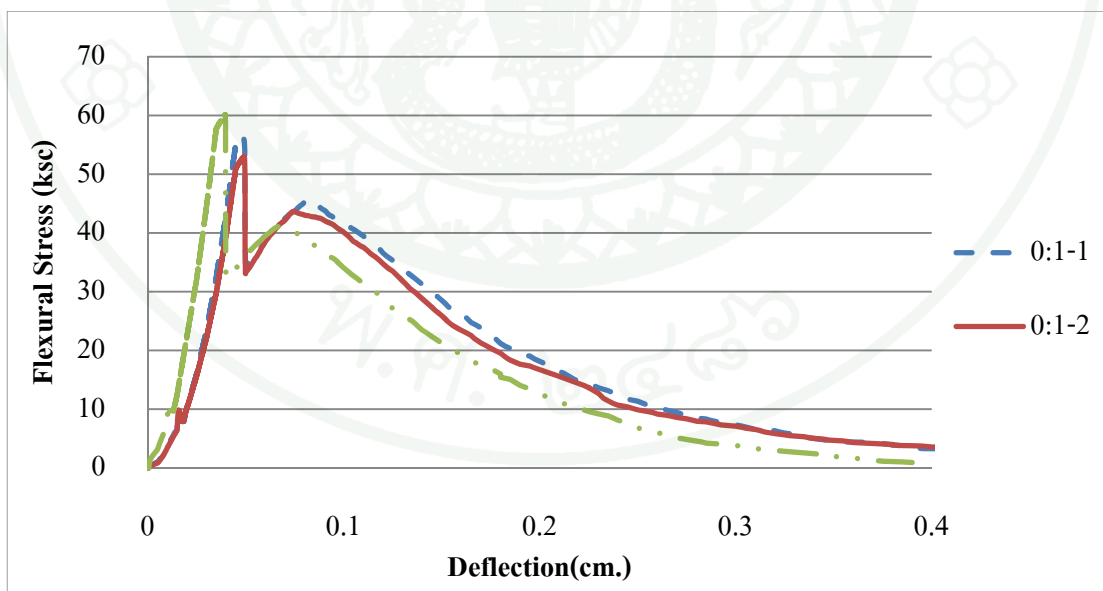
Steel:PVA (%)	การโก่งตัวที่ จุดแตกร้าวแรก (ซม.)	กำลังสูงสุดที่ จุดแตกร้าวแรก (ksc)	กำลังสูงสุดหลัง จุดแตกร้าวแรก (ksc)
0.00:0.00	0.050	58.11	1.25
0.00:0.50	0.045	59.26	31.37
0.00:1.00	0.040	56.49	45.38
0.50:0.00	0.050	55.15	39.34
1.00:0.00	0.105	84.94	86.56
0.50:0.50	0.050	67.63	65.42
0.25:0.75	0.055	59.72	61.69
0.75:0.25	0.030	55.99	79.93



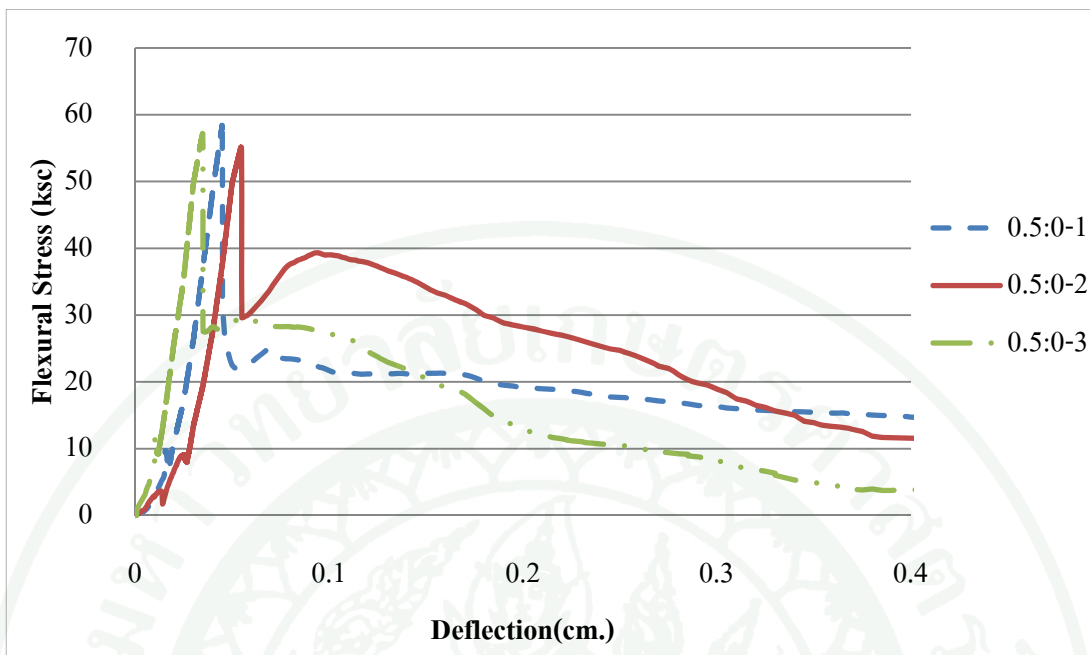
ภาพผนวกที่ ข9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตธรรมดา



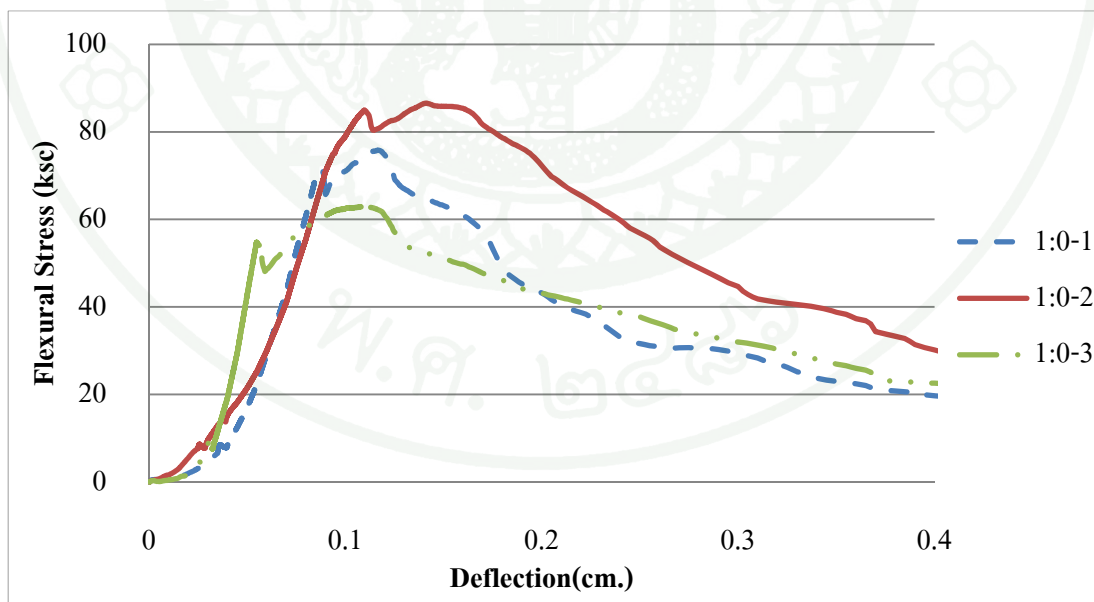
ภาพผนวกที่ ข10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใย PVA 0.5% โดยปริมาตร



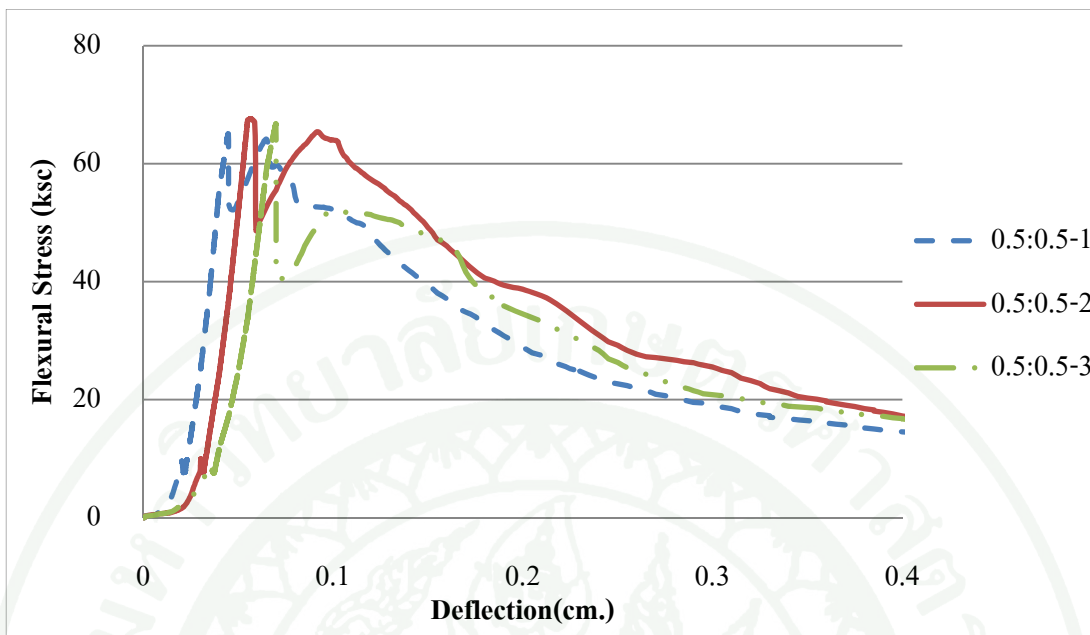
ภาพผนวกที่ ข11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใย PVA 1.0% โดยปริมาตร



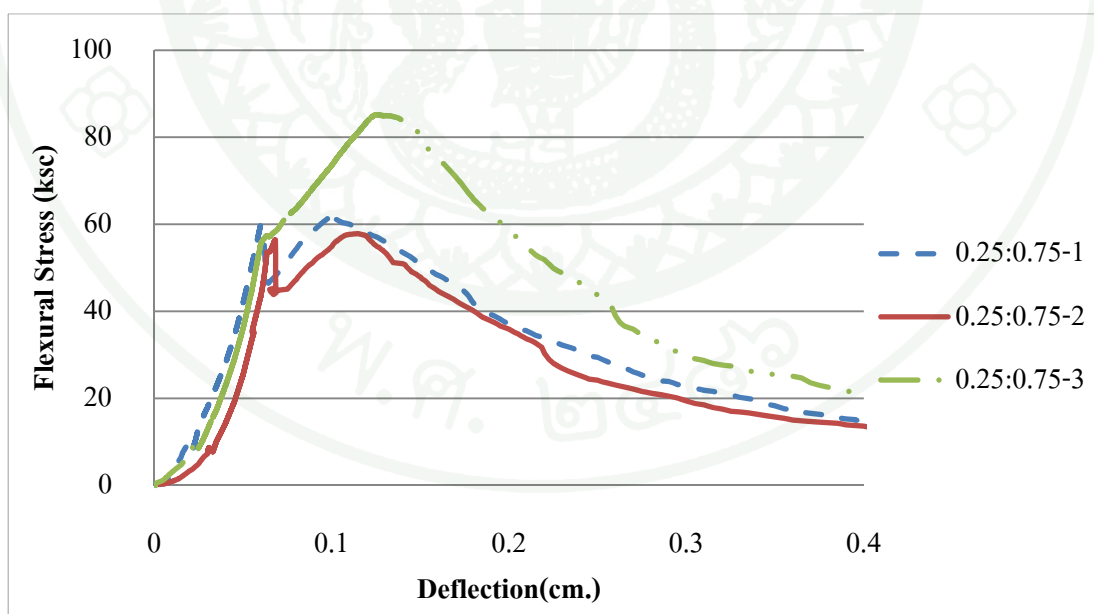
ภาพผนวกที่ ข12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 0.5% โดยปริมาตร



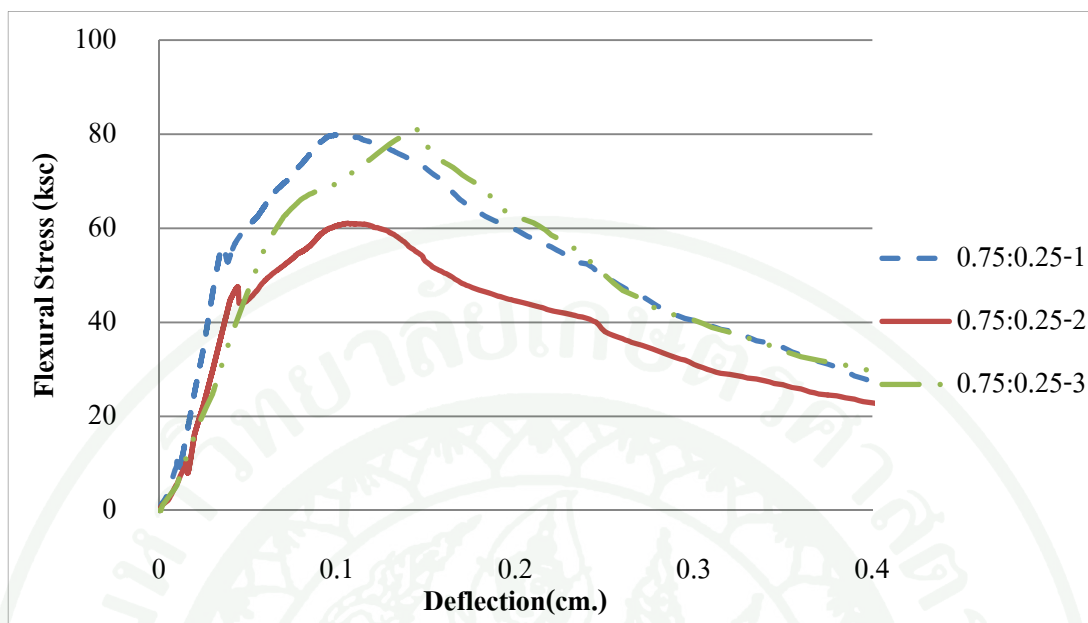
ภาพผนวกที่ ข13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 1.0% โดยปริมาตร



ภาพผนวกที่ ข14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก และPVA 0.5:0.5% โดยปริมาตร



ภาพผนวกที่ ข15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก และPVA 0.75:0.25% โดยปริมาตร



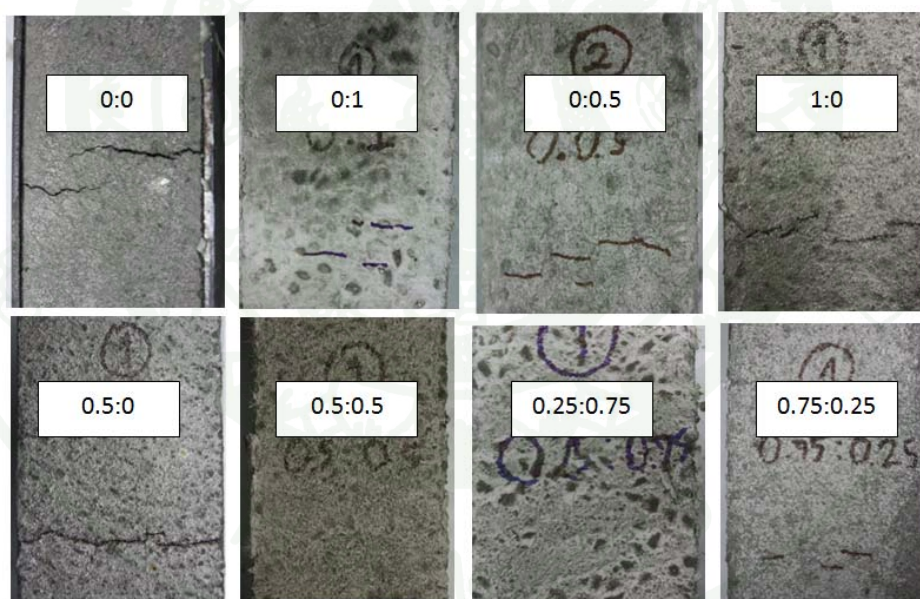
ภาพผนวกที่ ข16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นคดและการแอ่นตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก และPVA 0.75:0.25% โดยปริมาตร

ตารางผนวกที่ ข2 การหดตัวอิสระของคอนกรีตแบบแห้ง

ระยะเวลา (วัน)	การหดตัว ( $\times 10^{-6}$ มม./มม.)							
	0:0	0:0.5	0:1	0.5:0	1:0	0.5:0.5	0.25:0.75	0.75:0.25
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	180.11	166.67	146.00	172.67	166.67	143.67	139.46	153.00
14	307.11	238.78	214.67	270.33	252.33	208.89	203.00	226.00
21	362.22	265.00	230.89	311.33	281.00	223.00	215.33	245.17
28	384.11	277.67	239.89	329.56	295.00	231.56	221.89	254.17
35	399.11	287.33	246.33	342.00	305.33	237.67	226.11	261.33
42	407.11	293.67	250.33	351.67	312.33	242.00	228.67	266.67
49	416.11	297.56	257.00	358.22	318.17	244.00	230.78	273.00
56	419.78	299.44	258.89	362.78	321.83	247.67	231.22	277.00

ตารางผนวกที่ ข3 การหัดัวแบบพลาสติกโดยการประเมินจากรอยร้าว

อัตราส่วนเส้นใยเหล็ก : PVA (%)	ความกว้าง (มม.)	พื้นที่ (มม <sup>2</sup> )
0.00:0.00	1.097	135.190
0.00:0.50	0.143	11.969
0.00:1.00	0.136	7.266
0.50:0.00	0.296	30.592
1.00:0.00	0.208	20.084
0.50:0.50	0.000	0.000
0.25:0.75	0.000	0.000
0.75:0.25	0.122	5.257



ภาพผนวกที่ ข17 รอยร้าวจากการหัดัวแบบพลาสติก

ตารางผนวกที่ ๔4 การหดตัวของพลาสติกโดยการวิเคราะห์จากภาพขยายผ่านเลนส์

ระยะเวลา (นาทีก)	การหดตัวเฉลี่ยสะสม (ซม.)							
	0:0	0:0.5	0:1	0.5:0	1:0	0.5:0.5	0.25:0.75	0.75:0.25
0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0.110	0.065	0.050	0.084	0.063	0.058	0.043	0.072
30	0.154	0.114	0.086	0.139	0.105	0.097	0.084	0.117
45	0.182	0.140	0.112	0.167	0.137	0.118	0.099	0.136
60	0.198	0.153	0.122	0.183	0.161	0.131	0.108	0.146
120	0.235	0.166	0.146	0.210	0.183	0.144	0.125	0.157
180	0.235	0.174	0.158	0.210	0.190	0.146	0.136	0.157
240	0.235	0.176	0.158	0.210	0.190	0.146	0.138	0.157
300	0.239	0.176	0.158	0.210	0.190	0.146	0.138	0.157
360	0.239	0.176	0.158	0.210	0.190	0.146	0.138	0.157

ตารางผนวกที่ ๔5 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

Steel:PVA	สัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อน C ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
0.00:0.00	10.74
0.00:0.50	10.57
0.00:1.00	9.9
0.50:0.00	10.49
1.00:0.00	11.15
0.50:0.50	10.93
0.25:0.75	10.99
0.75:0.25	11.11

ตารางผนวกที่ ข6 ปริมาณคลอไรด์ที่ความลึกต่างๆของคอนกรีตในสภาวะอิมมัวและเปียกสลับ  
แห้ง

Steel:PVA	Sampling Intervals (mm.)	Wet and Dry		Saturate	
		% Cl <sup>-</sup>	pH	% Cl <sup>-</sup>	pH
0.00:0.00	1.0 - 2.0	0.0643	12.679	0.2908	12.676
	2.5 - 3.5	0.0341	12.659	0.0821	12.602
	4.0 - 5.0	0.0341	12.648	0.0508	12.605
	5.5 - 6.5	0.0331	12.688	0.0352	12.593
0.00:0.50	1.0 - 2.0	0.1552	12.665	0.1067	12.691
	2.5 - 3.5	0.0592	12.675	0.0633	12.652
	4.0 - 5.0	0.0377	12.628	0.0502	12.591
	5.5 - 6.5	0.0429	12.633	0.0375	12.654
0.00:1.00	1.0 - 2.0	0.1418	12.731	0.0795	12.643
	2.5 - 3.5	0.0657	12.604	0.0459	12.629
	4.0 - 5.0	0.0557	12.585	0.0521	12.628
	5.5 - 6.5	0.0355	12.646	0.0352	12.658
0.50:0.00	1.0 - 2.0	0.0421	12.725	0.1394	12.669
	2.5 - 3.5	0.0317	12.647	0.0658	12.686
	4.0 - 5.0	0.0341	12.614	0.0466	12.606
	5.5 - 6.5	0.0234	12.648	0.0319	12.652
1.00:0.00	1.0 - 2.0	0.0477	12.646	0.1509	12.683
	2.5 - 3.5	0.0357	12.691	0.0759	12.701
	4.0 - 5.0	0.0368	12.621	0.0539	12.654
	5.5 - 6.5	0.0345	12.653	0.0419	12.62

ตารางผนวกที่ ๖ (ต่อ)

Steel:PVA	Sampling Intervals (mm.)	Wet and Dry		Saturate	
		% Cl <sup>-</sup>	pH	% Cl <sup>-</sup>	pH
0.50:0.50	1.0 - 2.0	0.1088	12.626	0.0551	12.626
	2.5 - 3.5	0.0450	12.597	0.0396	12.637
	4.0 - 5.0	0.0238	12.643	0.0282	12.595
	5.5 - 6.5	0.0230	12.666	0.0216	12.652
0.25:0.75	1.0 - 2.0	0.0923	12.688	0.0447	12.616
	2.5 - 3.5	0.0387	12.694	0.0292	12.608
	4.0 - 5.0	0.0280	12.652	0.0341	12.665
	5.5 - 6.5	0.0272	12.078	0.0283	12.631
0.75:0.25	1.0 - 2.0	0.0527	12.681	0.0695	12.676
	2.5 - 3.5	0.0371	12.695	0.0364	12.68
	4.0 - 5.0	0.0378	12.662	0.0408	12.694
	5.5 - 6.5	0.0316	12.663	0.0378	12.661



ภาคผนวก ค  
วิธีการดำเนินการวิจัย

ตารางผนวกที่ ค1 คุณสมบัติของเส้นใยชนิดต่างๆ

Type of fiber	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Fiber elongation(%)	Density	Remarks
PVA fiber	880 -1600	25-40	6-10	1.30	-
PP fiber	600	5	25	0.91	Floats in water
Nylon fiber	750-900	3.4-4.9	13-25	1.10	-
Polyethylene fiber	250-700	1.4-2.2	10-15	0.95	-
High performance polyethylene fiber	2700	120	5	0.97	Expensive
Steel fiber	1200	200	3-4	7.85	Heavy, rusts
AR glass fiber	2200	80	0-4	2.78	Weak in alkali
Asbestos	620	160	-	2.55	Health risky

ที่มา: Horikoshi *et al.*(2006)



(ก)

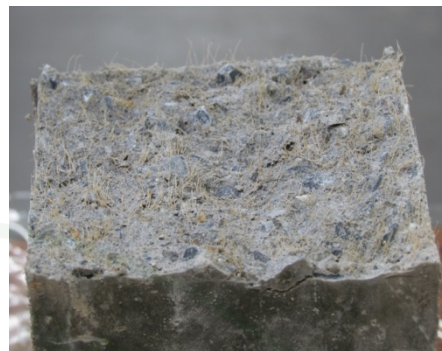


(ข)

ภาพผนวกที่ ค1 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล (ก) การทดสอบกำลังรับแรงอัด  
(ข) การทดสอบกำลังรับแรงดึง



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ค2 ตัวอย่างคอนกรีตผสมเส้นใยหลังจากการทดสอบกำลังรับแรงค้ำ

(ก) คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก (ข)คอนกรีตผสมเส้นใยPVA



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ค3 การทดสอบการหดตัวอิสระของคอนกรีตแบบแห้ง

(ก) การวัดการหดตัว (ข) ชิ้นตัวอย่างในการทดสอบ



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ๓ การทดสอบการหดตัวพลาสติกของคอนกรีตสด (ก) แบบหล่อคอนกรีตในการทดสอบ (ข) ลักษณะรอยร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ๓ การทดสอบการซึมผ่านคลอไรด์ (ก) การเจาะเก็บผงคอนกรีตตัวอย่าง (ข) เครื่อง Ion-selective-electrode

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวพัชราภรณ์ ทำบุญ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 13 ตุลาคม 2530
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-