



อิทธิพลของคุณสมบัติเชิงกลของใยสังเคราะห์ต่อคานปอซโซลานคอนกรีต

Influence of Mechanical Properties of Synthetic Polymers Fiber  
on Pozzolan Materials Concrete Beam

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรพันธ์ แสงสุวรรณและคณะ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายจ่ายประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2557  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



อิทธิพลของคุณสมบัติเชิงกลของใยสังเคราะห์ต่อคานปอซโซลานคอนกรีต

Influence of Mechanical Properties of Synthetic Polymers Fiber  
on Pozzolan Materials Concrete Beam

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรพันธ์ แสงสุวรรณและคณะ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายจ่ายประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2557  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

อิทธิพลของคุณสมบัติเชิงกลของใยสังเคราะห์ต่อคานปอซโซลานคอนกรีต  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรพันธ์ แสงสุวรรณและคณะ  
งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายจ่ายประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2557

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber) เส้นใยพลาสติก (โพลีพรอพิลีน) (Polypropylene) เถ้าลอย (Fly ash) ดินขาว (Meta kaolin) มาผสมเพิ่มเข้าไปในคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยใช้ค่า w/c เท่ากับ 0.42 โดยผสมเส้นใยเหล็กในปริมาณร้อยละ 0.5 และเส้นใยโพลีพรอพิลีนในปริมาณร้อยละ 0.25 ของน้ำหนักคอนกรีต ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบนี้ประกอบไปด้วยคอนกรีตธรรมดา(OPC) คอนกรีตผสมวัสดุพอลิโพรพิลีนเถ้าลอย ผสมเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ชนิดเส้นใยโพลีพรอพิลีน(FA/PP) คอนกรีตผสมวัสดุพอลิโพรพิลีนเถ้าลอย ผสมเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ชนิดเส้นใยเหล็ก(FA/ST) คอนกรีตผสมวัสดุพอลิโพรพิลีนดินขาว ผสมเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ชนิดเส้นใยโพลีพรอพิลีน(MK/PP) และคอนกรีตผสมวัสดุพอลิโพรพิลีนดินขาว ผสมเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ชนิดเส้นใยเหล็ก(MK/ST) โดยหล่อเป็นตัวอย่างแบบทรงกระบอกขนาด 10 x 20 เซนติเมตร ตัวอย่างแบบทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร และตัวอย่างแบบคานขนาด 10x10x35 เซนติเมตร หลังจากการบ่มน้ำ 28 วัน จึงนำตัวอย่างคอนกรีตไปทดสอบกำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัด และนำไปทำการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตด้วยวิธี Chloride Migration Test จากนั้นจึงนำมาหาค่ากำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัด และค่าการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีต การนำคอนกรีตผสมวัสดุพอลิโพรพิลีนมาผสมกับเส้นใยสังเคราะห์เพื่อพัฒนาคุณภาพของคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นอีก ทั้งยังช่วยลดการพูนของคอนกรีต และการซึมผ่านของคลอไรด์ที่เกิดขึ้นในคอนกรีต(เฉพาะในเขตภูมิประเทศที่ติดกับทะเล) จากการทดสอบสามารถบอกได้ว่า คอนกรีตผสมวัสดุพอลิโพรพิลีนกับผสมเส้นใยสังเคราะห์เข้าไปทำให้ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตดีขึ้นต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยสังเคราะห์ และปริมาณของวัสดุพอลิโพรพิลีนที่ผสมไป



## Abstract

This research aims to study the possibility of steel fibers, plastic fiber (poly propylene), fly ash and metakaolin mixed into the concrete. The concrete used in the research of the w / c 0.42 By 0.5 percent in the volume of steel fiber and poly propylene fiber in the amount of 0.25 percent by weight of the concrete. Concrete example of this test consisted of plain concrete(OPC).Concrete mixing materials pozzolan fly ash mixed plastics synthetic fibers of the type poly propylene fiber(FA/PP),concrete mixing materials pozzolan fly ash mixed plastics synthetic fibers of the type steel fibers (FA/ST), concrete mixing materials pozzolan meta kaolin mixed plastics synthetic fibers of kind polypropylene fiber(MK/PP) and concrete mixing materials pozzolan meta kaolin mixed plastics synthetic fibers of the type steel fibers (MK/ST) by casting a cylindrical sample size 10 x 20 cm. Sample size 10x10x10 cm. cube and sample size 10x10x35 cm. beam. After 28 days and cure water concrete examples to test the strength of the pull, compressive strength and flexural strength. And to test the movement of chloride through the concrete with Chloride Migration Test. Then bring the strength of the pull, compressive strength, flexural strength and the chloride permeability of concrete. Bringing concrete materials pozzolan mixed with synthetic fibers to develop the quality of concrete with improved efficiency and also reduces the porosity of the concrete. And permeability of chloride formed in the concrete (Only in landscape with the sea). The test can tell. Concrete mixing materials pozzolan with synthetic fibers to make a significant impact on the properties of concrete is improved as well. Depending on the type of polyester and the amount of material to pozzolan blended.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่ริเริ่มและนำเสนอแนวคิดการนำวัสดุพอลิไซลิกที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งและเส้นใยธรรมชาติ, สังเคราะห์นำมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต เพื่อลดพลังงานและมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งยังทำงานวิจัยต้นแบบและแบบอย่างในงานวิจัยและพัฒนาให้บรรลุไปได้ด้วยดี และผู้ช่วยนักวิจัยอาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้คำแนะนำและตรวจทานผลการวิจัยในครั้งนี้ให้ผ่านไปได้ด้วยดียิ่งขึ้นรวมทั้งเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่สละเวลาในการประสานงานและติดต่อกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ ที่ได้ให้ความกรุณาอนุเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้วิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรคณะวิศวกรรมศาสตร์และคณะวิทยาศาสตร์เคมีโดยเฉพาะ ดร.วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ หัวหน้าภาควิชาวิทยาศาสตร์เคมี อาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์เคมีทุกท่าน และเจ้าหน้าที่คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษา และให้ความอนุเคราะห์ในด้านการใช้ห้องทดลองปฏิบัติการทางเคมี รวมถึงขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณงามความดีทั้งหมดให้แก่มารดาและญาติของผู้วิจัยที่ให้การสนับสนุนให้ผู้วิจัยได้มีวันที่ผู้วิจัยได้มีวันนี้ รวมถึงให้กำลังใจกับผู้วิจัยในทุกๆด้านตลอดมาตั้งแต่ผู้วิจัยได้เกิดมาบนโลกใบนี้และให้ทัศนคติในการดำรงชีวิตให้สามารถดำรงชีวิตมาจนวันนี้ได้

จักรพันธ์ แสงสุวรรณและคณะ  
กรกฎาคม 2557

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญ (ต่อ)	ฉ
สารบัญภาพ	ช
สารบัญภาพ (ต่อ)	ซ
สารบัญตาราง	ฅ
บทที่ 1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ของการศึกษา	2
บทที่ 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 คอนกรีต	3
2.2 พลาสติกสังเคราะห์	5
2.3 คอนกรีตผสมเส้นใย	9
2.4 คุณสมบัติของโพลีพรอพิลีนต่อคอนกรีต	15
2.5 คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก	16
2.6 ดินขาว	17
2.7 วัสดุเถ้าลอย	20
2.8 การกักความร้อนและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต	24
บทที่ 3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ	35
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	35

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.3 อัตราส่วนผสมที่ใช้ทดสอบ	36
3.4 วิธีการทดสอบ	37
3.5 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	39
3.6 วิธีการทดสอบ	40
บทที่ 4. วิเคราะห์ผลการศึกษา	
4.1 พฤติกรรมการรับแรงอัด	44
4.2 พฤติกรรมการรับแรงดึง	47
4.3 พฤติกรรมการรับแรงดัด	50
4.4 การซึมผ่านของสารละลายในปอซีโซลานคอนกรีต	54
บทที่ 5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 คุณสมบัติเชิงกล	59
5.2 การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีต	60
5.3 ข้อเสนอแนะ	60
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>61</b>
ภาคผนวก ก. คุณสมบัติของเส้นใยที่ใช้ในการทำการทดลอง	
ภาคผนวก ข. วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	
ภาคผนวก ค. วิธีการทดลอง	

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2-1 โครงสร้างโพลีเมอร์แบบเส้นยาวตลอด	5
ภาพที่ 2-2 โครงสร้างโพลีเมอร์แบบแยกแขนโดยรอบ	6
ภาพที่ 2-3 โครงสร้างโพลีเมอร์แบบแยกเชื่อมโยง	6
ภาพที่ 2-4 เม็ดพลาสติกสังเคราะห์ชนิดโพลีเอทิลีน	7
ภาพที่ 2-5 เม็ดพลาสติกสังเคราะห์ชนิดโพลีพรอพิลีน	9
ภาพที่ 2-6 การกระจายตัวของเส้นใยในลักษณะต่างๆ	10
ภาพที่ 2-7 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 39	12
ภาพที่ 2-8 การทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 496	12
ภาพที่ 2-9 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 78	13
ภาพที่ 2-10 แสดงตำแหน่งการโค้งตัวของการทดสอบมาตรฐาน ASTM C 1018	14
ภาพที่ 2-11 แสดงลักษณะของเส้นใยเหล็ก	16
ภาพที่ 2-12 เซลล์ไฟฟ้าเคมีของการเกิดการกัดกร่อนในเหล็ก	25
ภาพที่ 2-13 ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนบนผิวเหล็กเสริม	25
ภาพที่ 2-14 ปริมาตรสัมพัทธ์ของเหล็กและผลิตภัณฑ์ของการสนิม	26
ภาพที่ 2-15 ความเสียหายเนื่องจากคลอไรด์โดยเหล็กเป็นสนิมต้นคอนกรีต	27
ภาพที่ 2-16 เหล็กถูกปกป้องจาก Passive layer จากการเกิดสนิม	28
ภาพที่ 2-17 การทำลายชั้น Passive layer โดยสารเคมีรุนแรง	28
ภาพที่ 2-18 การเข้าทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมของคลอไรด์	29
ภาพที่ 2-19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น threshold chloride ion และ ระดับ pH	30
ภาพที่ 2-20 เส้นทางการแพร่ในคอนกรีต	31
ภาพที่ 2-21 รูปแบบของคลอไรด์ที่แตกต่างกันของคอนกรีต	32
ภาพที่ 2-22 ภาพจำลองโครงสร้างทางเคมีของ Friedel's salt	34
ภาพที่ 3-1 ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานของคอนกรีต ASTM C 39	40
ภาพที่ 3-2 ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C78-94	41
ภาพที่ 3-3 ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C496	41
ภาพที่ 3-4 ตัวอย่างการเตรียมก้อนคอนกรีตเข้าเครื่องทดสอบ	42
ภาพที่ 3-5 ตัวอย่างการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้า	43



สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของคอนกรีตธรรมดา กับคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์	44
ภาพที่ 4-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของคอนกรีต OPC กับคอนกรีต MK ผสมเส้นใยสังเคราะห์	45
ภาพที่ 4-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของคอนกรีต OPC กับคอนกรีต FA ผสมเส้นใยสังเคราะห์	45
ภาพที่ 4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของคอนกรีต OPC คอนกรีต FA และคอนกรีต MK ผสมเส้นใยสังเคราะห์	46
ภาพที่ 4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงของคอนกรีตธรรมดา กับคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์	47
ภาพที่ 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงของคอนกรีต OPC กับคอนกรีต MK ผสมใยสังเคราะห์	48
ภาพที่ 4-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงของคอนกรีต OPC กับคอนกรีต FA ผสมเส้นใยสังเคราะห์	49
ภาพที่ 4-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงของคอนกรีต OPC คอนกรีต FA และคอนกรีต MK ผสมเส้นใยสังเคราะห์	50
ภาพที่ 4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดัดของคอนกรีตธรรมดา กับคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์	51
ภาพที่ 4-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดัดของคอนกรีต OPC กับคอนกรีต MK ผสมเส้นใยสังเคราะห์	52
ภาพที่ 4-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงของคอนกรีต OPC กับคอนกรีต FA ผสมเส้นใยสังเคราะห์	53
ภาพที่ 4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดัดของคอนกรีต OPC คอนกรีต FA และ MK ผสมเส้นใยสังเคราะห์	54
ภาพที่ 4-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์กับเวลาของคอนกรีต OPC	55
ภาพที่ 4-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์กับเวลาของคอนกรีต MK	56
ภาพที่ 4-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์กับเวลาของคอนกรีต FA	57
ภาพที่ 4-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์กับเวลาของคอนกรีต	58

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนขนาดภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	4
ตารางที่ 2-2 ลักษณะทางกายภาพของ POLYETHYLENE	8
ตารางที่ 2-3 ลักษณะทางกายภาพของ POLYPROPYLENE	9
ตารางที่ 3-1 แสดงคุณสมบัติของเส้นใยผสมคอนกรีตในตัวอย่างการทดลอง	35
ตารางที่ 3-2 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต	37
ตารางที่ 3-3 รายละเอียดแสดงจำนวนตัวอย่างและการทดสอบ	38



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันทั่วโลกอุตสาหกรรมการก่อสร้างส่วนใหญ่นิยมใช้คอนกรีตเป็นวัสดุหลัก ด้วยเหตุผลที่ว่าคอนกรีตเป็นวัสดุที่สามารถก่อสร้างให้มีรูปร่างลักษณะและขนาดได้ตามต้องการ ไม่ถูกจำกัดเหมือนวัสดุอื่น เช่น อิฐ ไม้หรือเหล็ก อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมทั้งทางด้านราคาและมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกในรูปของกำลังอัดสูง แต่อย่างไรก็ตามคอนกรีตก็ยังมีจุดด้อยตรงที่เป็นวัสดุเปราะ มีความสามารถในการรับแรงดึงต่ำจึงมีการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเพิ่มความเหนียวให้คอนกรีตทำได้โดยการผสมเส้นใยเข้าไปในเนื้อคอนกรีต โดยเน้นไปที่การเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระทำหลังการแตกร้าวครั้งแรก (First Crack) รวมถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานแตกหัก (Fracture Energy Absorption)

การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีหลายปัจจัย เช่น การเกิดสนิม เป็นปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีตในด้านการรับกำลังและลักษณะทางกายภาพ โดยเฉพาะเรื่องของความสามารถในการรับน้ำหนักตามที่ออกแบบไว้จะลดลง ทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยกับโครงสร้างและปัญหาของคอนกรีตที่เป็นจุดด้อยที่น่าสนใจอีกปัจจัยหนึ่งคือ คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเปราะมีความสามารถในการรับแรงดึงต่ำดังนั้นในโครงสร้างคอนกรีตบางกรณีที่ต้องการให้มีคุณสมบัติในความเหนียวเช่นชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปหรืองานคอนกรีตในที่โล่งแจ้งเพื่อลดการแตกร้าวที่ผิวหน้าของคอนกรีต จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจในการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตด้วยการเพิ่มความเหนียวให้คอนกรีตทำได้โดยการผสมเส้นใยสังเคราะห์เข้าไปในส่วนผสมของปอชโซลานคอนกรีตโดยมุ่งประเด็นหลักไปที่การเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระทำหลังการแตกร้าวครั้งแรก (First Crack) รวมถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานแตกหัก (Fracture Energy Absorption) สำหรับประเด็นที่พิจารณารองลงมาเป็นการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านและการเคลื่อนที่ของสารละลายที่อยู่ในปอชโซลานคอนกรีตด้วยวิธีการทดสอบ Chloride Migration Test โดยใช้ปอชโซลานคอนกรีตและคอนกรีตควบคุมที่มีปฏิภาคส่วนผสมสอดคล้องกันทุกตัวอย่างการทดลองและทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆกันในการทดลองและทำการวัดปริมาณคลอไรด์ที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตเพื่อตรวจสอบความสามารถในการซึมผ่านของสารละลายในคอนกรีต

ใยสังเคราะห์ชนิดโพลีโพรพิลีนจัดเป็นโพลีเมอร์ชนิดหนึ่งที่ได้จากการผลิตของสารไฮโดรคาร์บอนชื่อโพรพีนและนำมาประยุกต์ใช้งานคอนกรีต เนื่องจากมีต้นทุนที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับใยสังเคราะห์ประเภทอื่นมีคุณสมบัติไม่ดูดซับน้ำหรือทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปอชโซลานคอนกรีต ทนทานต่อสภาพกรดและด่างได้ดีมีน้ำหนักเบาโดยในปัจจุบันวงการก่อสร้างได้นำเส้นใยโพลีโพรพิลีนมาใช้ในงานชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปหรืองานคอนกรีตที่ต้องการความสวยงามที่ผิวของคอนกรีตโดยที่เส้นใยจะช่วยลดการแตกร้าวซึ่งเป็นการประหยัดเวลาในการทำงานได้ดี

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยสังเคราะห์ต่อปอซโซลานคอนกรีต และเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของวัสดุประสานที่ใช้กับคอนกรีตผสมเส้นใยและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของปอซโซลานคอนกรีตในการซึมผ่านของสารละลายในปอซโซลานคอนกรีตด้วยการทดสอบ Chloride Migration Test

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาถึงผลกระทบของคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยสังเคราะห์ที่อัตราส่วนต่างๆต่อปอซโซลานคอนกรีตเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ผสมเส้นใย

1.3.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของวัสดุประสานของเถ้าลอยและดินขาวที่ใช้กับคอนกรีตผสมเส้นใยต่อการซึมผ่านของสารละลาย ในปอซโซลานคอนกรีตด้วยการทดสอบ Chloride Migration Test

1.3.3 เส้นใยที่ใช้เป็นเส้นใยสังเคราะห์จำพวกพลาสติกชนิดเส้นใยโพลีพรอพิลีน และชนิดเส้นใยเหล็ก

1.3.4 ทดสอบกำลังตัดตามมาตรฐาน ASTM C78 ทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 39 และทดสอบกำลังดึงตามมาตรฐาน ASTM C 496 และการทดสอบ Chloride Migration Test

## 1.4 ประโยชน์ของการศึกษา

การศึกษานี้เป็นประโยชน์และองค์ความรู้ในการศึกษาสำหรับการตัดสินใจที่จะนำเอาวัสดุประสานประเภทปอซโซลานมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตผสมเส้นใย เพื่อที่จะทราบถึงความคงทนและอายุการใช้งานเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป และนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ โดยการนำวัสดุเหลือทิ้ง นำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือในอีกมุมหนึ่งสามารถจะช่วยในการวางแผนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้คอนกรีตผสมเส้นใยในการก่อสร้างได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้การศึกษานี้สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลที่จำเป็นต่อไปเพื่อเป็นแนวทางในการผลิตคอนกรีตผสมเส้นใย ตลอดจนการใช้เถ้าลอย (Fly ash) และดินขาว (Meta kaolin) ที่มีอยู่ในประเทศไทยให้เกิดประโยชน์สูงสุด

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับเนื้อหาในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึงคอนกรีตพลาสติกสังเคราะห์คอนกรีตผสมเส้นใยต่างๆ คอนกรีตผสมดินขาว ถ้าถ่านหิน ลักษณะและพฤติกรรมของคอนกรีตมาตรฐานและตลอดจนงานวิจัยที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาคูณสมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์

#### 2.1 คอนกรีต (Concrete)

คอนกรีตคือวัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันทั้งนี้เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติหลายประการที่เหมาะสมเช่นสามารถหล่อขึ้นรูปได้ตามต้องการมีความคงทนสูง ตกแตงผิวให้สวยงามได้และที่สำคัญคือมีราคาถูกโดยเฉพาะเมื่อเปรียบกับราคาเหล็กรูปพรรณ โดยทั่วไปคอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสมพื้นฐาน 2 ส่วนคือส่วนแรกจะเรียกว่าซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) ได้แก่ปูนซีเมนต์น้ำและสารผสมเพิ่มส่วนที่สองประกอบไปด้วยมวลรวม (Aggregates) ได้แก่มวลรวมละเอียดหรือทรายและมวลรวมหยาบหรือหินหรือกรวดโดยเมื่อนำส่วนผสมต่างๆเหล่านี้มาผสมกันจะได้คอนกรีตที่คงสภาพเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่งพอที่จะนำไปเทลงแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการได้โดยเรียกคอนกรีตในสภาพนี้ว่า “คอนกรีตสด (Fresh Concrete)” หลังจากนั้นคอนกรีตจะเปลี่ยนสภาพไปเป็นของแข็งในเวลาต่อมาโดยจะมีความแข็งแรงมากขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้นคุณสมบัติของคอนกรีตแข็งตัวผ่านข้อกำหนดด้านการรับแรงตามที่ต้องการแล้วจึงสามารถเปิดใช้งานรับน้ำหนักได้ต่อไปซึ่งเราจะเรียกคอนกรีตสภาพที่เป็นของแข็งแล้วนี้ว่า “คอนกรีตแข็งตัวแล้ว (Hardened Concrete)” คุณสมบัติของคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ คุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพซึ่งคุณสมบัติทั้งสองจะมีความสำคัญไปตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตนั้นอย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งสองลักษณะจะมีผลต่อกันและกันการทำให้คอนกรีตแข็งตัวแล้วมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นจะต้องมาจากการเลือกใช้วัสดุและส่วนผสมคอนกรีตตลอดจนการทำคอนกรีตที่ดีทุกขั้นตอนเพื่อให้ได้คอนกรีตมีคุณสมบัติตรงตามที่ต้องการ

##### 2.1.1 คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต (Mechanical Properties of Concrete)

###### 2.1.1.1 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหมายถึงความต้านทานต่อหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นโดยไม่เกิดรอยแตกร้าวและการพังทลายโดยกำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการได้แก่กำลังของมอร์ตาร์กำลังของมวลรวมหยาบและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ตาร์กับมวลรวมหยาบ

###### 2.1.1.2 กำลังรับแรงดึง (Tensile Strength)

คอนกรีตจัดเป็นวัสดุเปราะคือมีกำลังรับแรงอัดสูงและกำลังรับแรงดึงต่ำประมาณร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 15 ของกำลังรับแรงอัดกำลังรับแรงดึงหมายถึงความต้านทานในการรับแรงดึงของคอนกรีตถึงแม้ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคอนกรีตจะไม่ได้รับแรงดึงก็

ตามแต่การทราบค่ากำลังดึงนี้จะช่วยในการควบคุมการแตกร้าวของคอนกรีตจากผลกระทบต่างๆ เช่น อุณหภูมิการหดตัวและมีประโยชน์อย่างมากในงานคอนกรีตอัดแรงเป็นต้น

### 2.1.1.3 กำลังเฉือน (Shear Strength)

การเฉือนเป็นการกระทำของแรงสองแรงซึ่งมีขนาดเท่ากันและขนานกันโดยกระทำตรงข้ามบนระนาบซึ่งมีระยะห่างกันเล็กน้อยแรงเฉือนมักจะเกิดขึ้นพร้อมกับแรงดึงและแรงดัดเสมอการทดสอบความต้านทานแรงเฉือนในคอนกรีตโดยตรงนี้ไม่สะดวกเช่นเดียวกับการทดสอบการหาความต้านทานแรงดึงทั้งนี้เป็นเพราะค่าแรงดัดแรงกดและแรงดึงในแนวทแยงจะมีส่วนเกี่ยวข้องทำให้ผลการทดสอบไม่ถูกต้องปกติการทดสอบหาความต้านทานแรงเฉือนกระทำได้โดยการบิดแท่งตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกพบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนมีค่าประมาณร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 25 ของกำลังรับแรงอัดค่าความต้านทานแรงเฉือนนี้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของคอนกรีตเช่นเดียวกับค่ากำลังอัดประลัย

### 2.1.1.4 กำลังยึดเหนี่ยว (Bond Strength)

กำลังยึดเหนี่ยวเป็นการต้านทานการลื่นไถลของเหล็กเสริมที่หล่ออยู่ภายในเนื้อคอนกรีตแรงต้านทานนี้เกิดจากการยึดติดกันของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วจากความเสียดทานระหว่างเหล็กเสริมคอนกรีตกับผิวคอนกรีตนั้นต้องเพียงพอที่กำลังยึดเหนี่ยวกับเนื้อคอนกรีตมาตรฐานการออกแบบมักกำหนดค่าแรงยึดเหนี่ยวเป็นเปอร์เซ็นต์ของกำลังอัดของคอนกรีตและขนาดของเหล็กเสริมที่ใช้อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์สารผสมเพิ่มและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์อีกด้วย

## 2.1.2 คุณสมบัติด้านกายภาพของคอนกรีต (Physical Properties of Concrete)

### 2.1.2.1 การขยายตัวของคอนกรีต (Thermal Expansive)

การขยายตัวของคอนกรีตภายใต้อุณหภูมิของคอนกรีตเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องรู้เนื่องจากคอนกรีตมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปซึ่งการเปลี่ยนแปลงขนาดบางครั้งอาจมากพอที่จะทำให้คอนกรีตเกิดการวิบัติได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่คอนกรีตมีกำลังรับแรงดึงต่ำโดยคุณสมบัติการขยายตัวมักจะแสดงอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนขนาดภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Coefficient of Thermal Expansion) ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2-1

**ตารางที่ 2-1** สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนขนาดภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิชนิดของวัสดุค่าการเปลี่ยนแปลง

ชนิดของวัสดุ	ค่าการเปลี่ยนแปลง
ซีเมนต์เพสต์	$18-20 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
คอนกรีต	$7.5-13 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
มวลรวมหยาบ	(Granite) $7-9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
มวลรวมหยาบ	(Basalt) $6-8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
เหล็ก	$11-12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

### 2.1.2.2 การนำอุณหภูมิ (Thermal Conductivity)

สัมประสิทธิ์การเป็นตัวนำอุณหภูมิ(Coefficient of Thermal Conductivity,K) หมายถึงอัตราการไหลของความร้อนอย่างสม่ำเสมอหนึ่งหน่วยผ่านวัสดุที่มีความหนาหนึ่งหน่วยและมีพื้นที่หน้าตัดแต่ละด้านเท่ากับหนึ่งหน่วยซึ่งในซีเมนต์จะมีค่า K อยู่ประมาณ 1-1.5 W/m.K ในส่วนของมวลรวมหยาบหรือหินทั่วไปจะมีค่า K อยู่ที่ประมาณ 3 W/m.K ค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุมักจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวแต่ตัวแปรที่สำคัญคือความชื้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้ค่า K เพิ่มขึ้นไปด้วยดังสมการที่ใช้ในการหาค่าการนำอุณหภูมิ

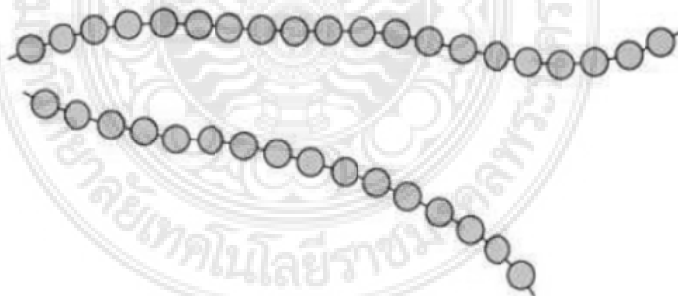
## 2.2 พลาสติกสังเคราะห์ (Synthetic Polymers)

พลาสติกสังเคราะห์หรือโพลิเมอร์สังเคราะห์คือสารสังเคราะห์(Synthetic Materials) ที่มนุษย์คิดค้นขึ้นมาเกิดจากการรวมตัวของโมเลกุลง่ายๆหรือโมเลกุลอิสระ(Monomers) โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีที่เรียกว่าโพลิเมอร์ไรเซชัน(Polymerization) โครงสร้างของโพลิเมอร์หรือลักษณะลำตัวและการจัดรูปร่างโมเลกุลของโพลิเมอร์มีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับประเภทของโพลิเมอร์และกรรมวิธีสังเคราะห์ซึ่งความแตกต่างของโครงสร้างมีผลต่อคุณสมบัติด้าน เช่น ความหนาแน่นความเหนียวความเปราะความยืดหยุ่นความแข็งความใส เป็นต้น

### 2.2.1 โครงสร้างของโพลิเมอร์

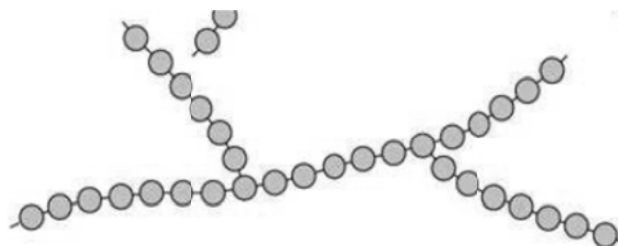
โพลิเมอร์เป็นสารที่มีโมเลกุลยาวมากมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากและโมเลกุลเหล่านี้ประกอบด้วยหน่วยที่ซ้ำๆกันเป็นจำนวนมากซึ่งสามารถแยกโครงสร้างของโพลิเมอร์มีแบบต่างๆดังนี้

2.2.1.1 โพลิเมอร์แบบเส้นยาวตลอด (Linear Shape) ลำตัวยาวจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งมีความแข็งแรงสูงขึ้นทนความร้อนได้ดีโครงสร้างแบบนี้เป็นโครงสร้างของพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ดังภาพที่ 2-1



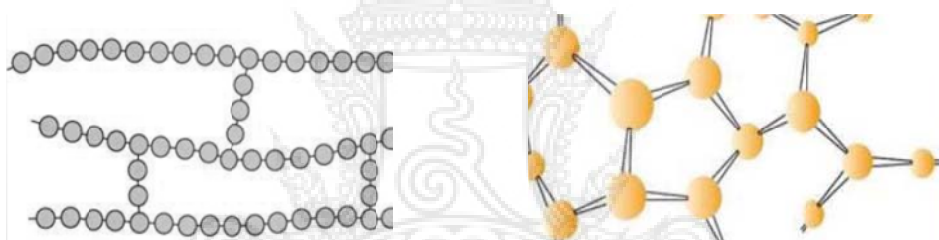
ภาพที่ 2-1 โครงสร้างโพลิเมอร์แบบเส้นยาวตลอด  
ที่มา; ปิติ (2549)

2.2.1.2 โพลิเมอร์แบบแยกแขนโดยรอบ (Branched Shape) จากภาพที่ 2-2 โครงสร้างแบบนี้ทำให้โมเลกุลอยู่ห่างกัน ทำให้มีความหนาแน่นน้อยโครงสร้างแบบนี้เป็นโครงสร้างของพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกอีกประเภทหนึ่ง



ภาพที่ 2-2 โครงสร้างโพลิเมอร์แบบแยกแขนโดยรอบ  
ที่มา; ปิติ (2549)

2.2.1.3 โพลิเมอร์แบบเชื่อมโยงหรือร่างแห (Cross linked or Networked) ดังภาพที่ 2-3 โครงสร้างแบบนี้ทำให้โพลิเมอร์มีความหนาแน่นสูงมีความแข็งแรงทนความร้อนได้ดี โครงสร้างแบบนี้ส่วนมากเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติง (Thermosetting)



(a) Cross linked

(b) Networked

ภาพที่ 2-3 โครงสร้างโพลิเมอร์แบบแยกเชื่อมโยง  
ที่มา; ปิติ (2549)

## 2.2.2 ประเภทของพลาสติก

พลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.2.2.1 เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) หรือเทอร์โมเซต (Thermoset) คือพลาสติกที่มีรูปทรงถาวรเมื่อผ่านกรรมวิธีผลิตโดยใช้ความร้อนและแรงอัดหรือผ่านกรรมวิธีการผลิตประเภทหล่อพลาสติกเหลวที่ใช้สารเคมีผสมลงไปทำให้เกิดการแข็งตัวจะนำไปหลอมละลายไปนำกลับมาใช้อีกไม่ได้บางประเทศเรียกพลาสติกชนิดนี้ว่าดูโรพลาสติก (Duroplastics) และพลาสติกชนิดนี้ที่ใช้กันทั่วไปตัวอย่างเช่นอมิโนชนิดยูเรียและเมลามีนอีพอกซีฟีนอลิกโพลีเอสเทอร์ซิลิโคน, ยูรีเทน เป็นต้น

2.2.2.2 เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) คือ พลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีกหลังจากนำไปหล่อทำเป็นผลิตภัณฑ์แล้วค่อยๆ ฝังเมื่อถูกความร้อนก็จะละลายกลายเป็นของเหลวชั้น และเมื่อเย็นตัวก็จะกลับมาแข็งตัวเทอร์โมพลาสติกที่สำคัญและใช้กันอยู่ทั่วไป ได้แก่ อะซีทัล(Acetal)



อะคริลิก (Acrylic) โพลีโอเลฟิน (Polyolefins) ชนิดโพลีเอทิลีน (Polyethylene) และโพลีพรอพิลีน (Polypropylene) เป็นต้น

2.2.2.3 พลาสติกโพลีโอเลฟิน (Polyolefins) ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะพลาสติกที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยโดยพลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

2.2.2.4 โพลีเอทิลีน (Polyethylene) โดยทั่วไปมีลักษณะใสเมื่อเป็นแผ่นบางและจะมีสีขุ่นเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นสามารถทำเป็นสีต่างๆได้ตามต้องการคุณสมบัติมีน้ำหนักเบามากคือมีความถ่วงจำเพาะ 0.92 เท่านั้นสามารถพับงอได้ในรูปของเส้นใยรับแรงดึงได้ 5,600 ksc. มีความยืดตัวได้สูงถึง 5 เท่าตัวฉีกขาดยากมีลักษณะคล้ายขี้ผึ้งไม่เกาะติดน้ำเป็นฉนวนได้ดีมากทนความร้อนได้น้อยแต่ทนความเย็นได้มากถึง  $-73^{\circ}\text{C}$  โดยไม่ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงทนกรดและด่างอ่อนแต่จะเกิดปฏิกิริยาอย่างช้าๆกับ Oxidizing Acids ไม่ทนน้ำมันและไขมันและในขณะที่มีอุณหภูมิสูงแม้ว่าจะไม่ดูดซึมความชื้นแต่ยอมให้ก๊าซผ่านได้การใช้ประโยชน์นิยมใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารขวดบรรจุของเหลวแผ่นกันความชื้นในอาคารและนำกลับมารีไซเคิลเป็นของใช้ราคาถูกพลาสติกในชนิดนี้ที่เมื่อแยกออกตามกรรมวิธีการผลิตและส่วนผสมจะมีหลายประเภทซึ่งแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปยกตัวอย่างเช่นโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET, PETE) ใช้ทำขวดบรรจุน้ำดื่มขวดบรรจุของดองขวดน้ำมันพืชสามารถนำมารีไซเคิลเป็นเส้นใยสำหรับทำเสื้อกันหนาวพรมใยสังเคราะห์สำหรับยัดหมอนถุงหิ้วกระเป๋าขวดโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) ใช้ทำขวดนม น้ำผลไม้โยเกิร์ตบรรจุภัณฑ์สำหรับน้ำยาทำความสะอาดแชมพูสระผมแปรงเด็กและถุงหิ้วสามารถนำมารีไซเคิลเป็นขวดใส่น้ำยาซักผ้าขวดน้ำมันเครื่องท่อถังพลาสติกไม้เทียมเพื่อใช้ทำราวหรือม้านั่งในสวน โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) ใช้ทำฟิล์มห่ออาหารและห่อของถุงใส่ขนมปังถุงเย็นสำหรับบรรจุอาหารสามารถนำมารีไซเคิลเป็นถุงดำสำหรับใส่ขยะถุงหิ้วถังขยะกระเบื้องปูพื้นเฟอร์นิเจอร์แต่งไม้เทียม



ภาพที่ 2-4 เม็ดพลาสติกสังเคราะห์ชนิดโพลีเอทิลีน  
ที่มา; ปิติ (2549)

ตารางที่ 2-2 ลักษณะทางกายภาพของ POLYETHYLENE

ลักษณะทางกายภาพ	Low Density	Intermediate Density	High Density
ความถ่วงจำเพาะ	0.91-0.925	0.925-0.926	0.941-0.965
ทนแรงดึง (ksc)	70-162	84-246	218-387
ทนแรงกระทบ	ไม่ฉีกขาด	0.5-16.0	0.8-2.0
ทนความร้อน c	82-100	104-121	121
ความดูดซึมน้ำ (24 ชม.)	0.015	0.01	0.01
ความง่ายต่อการติดไฟ	2.64	2.59	2.59
ทนกรดอ่อน	ไม่ดี	ได้	ได้
ทนกรดแก่	ไม่ทน Oxidizing	จะถูกทำลายอย่างช้าๆ จาก Oxidizing Acids	
ทนด่างอ่อน-แก่	ได้	ได้	ได้
ทนสารละลาย	ได้ถ้าต่ำกว่า 60 c		ได้ถ้าต่ำกว่า 77c

2.2.3.2 โพลีโพรพิลีน (Polypropylene) โดยทั่วไปมีลักษณะคล้ายโพลีเอทิลีนดังภาพที่ 2-5 แต่คุณสมบัติดีกว่าทนทานและแข็งแรงกว่ามีความถ่วงจำเพาะ 0.91 ซึ่งน้อยกว่าทนความร้อนได้ดีกว่าสามารถใช้งานในอุณหภูมิสูงถึง 140°C ในรูปของเส้นใยรับแรงดึงได้ถึง 7,000 ksc. ทดสอบอย่างง่ายคือใช้เล็บขีดหากเป็นโพลีเอทิลีนจะขีดออกหากเป็นโพลีโพรพิลีนจะขีดไม่ออกเพราะแข็งแรงกว่าการใช้ประโยชน์ใช้ทำภาชนะบรรจุอาหาร เช่น กล่องขามจาน ถังตะกร้า กระบอกใส่น้ำแช่เย็น ขวดซอส แก้วโยเกิร์ต ขวดบรรจุยา โดยจะสามารถนำพลาสติกเหล่านี้นำมารีไซเคิลเป็นกล่องแบตเตอรี่ในรถยนต์ ชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น กันชนและกรวยสำหรับน้ำมันไฟท้าย ไม้กวาดพลาสติก แปรง เป็นต้น เป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นโดย Giulio Natta และนักเคมีชาวเยอรมัน Karl Rehn ในเดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 1954 ในประเทศสเปน โดย Polypropylene ที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบผลึกชนิด isotactic การค้นพบครั้งนี้เป็นการบุกเบิกนำไปสู่การผลิตเพื่อการค้าต่อมาในปี 1957 และ Giulio Natta และผู้ร่วมงานยังได้สังเคราะห์ PP ชนิด syndiotactic ขึ้นเป็นครั้งแรกเทอร์โมพลาสติกประเภทโพลีโพรพิลีน ผลิตจากโพรพิลีน เป็นของแข็ง ไม่มีสี มีทั้งโปร่งใสและโปร่งแสง ผิวเป็นมันเงา ทนกรด เบส และสารเคมีต่างๆ ยกเว้นไฮโดรคาร์บอนและคลอรีเนเตดไฮโดรคาร์บอน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามโครงสร้างของโพลีโพรพิลีน ได้แก่ ไอโซแทกติกโพลีโพรพิลีน และซินดิโอแทกติกโพลีโพรพิลีนและแอนแทกติกโพลีโพรพิลีน มีสมบัติดีกว่าโพลีเอทิลีนหลายอย่าง ได้แก่ ทนแรงกระแทกสูง ทนการขีดข่วน ทนสารเคมี มีจุดอ่อนตัวสูง มีความหนาแน่นต่ำ และมีอุณหภูมิในการหลอมสูง ทำให้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 120 °C



ภาพที่ 2-5 เม็ดพลาสติกสังเคราะห์ชนิดโพลีพรอพิลีน  
ที่มา; ปีติ (2549)

ตารางที่ 2-3 ลักษณะทางกายภาพของ POLYPROPYLENE

ลักษณะทางกายภาพ	Unmodified	Copolymer	Impact Type
ความถ่วงจำเพาะ	0.904	0.90	0.91
ทนแรงดึง (ksc)	387	317	310
ทนแรงดึง (ksc)	562	462	491
ทนแรงกระทบ	1.5	10	15
ทนความร้อน c	135	104	102
ความใส	โปร่งใส	โปร่งใส	ทึบ
ทนแสงแดด	พอใช้	พอใช้	พอใช้
ทนกรดอ่อน	ไม่ดี	ได้	ได้
ทนกรดแก่	จะถูกทำลายอย่างช้าๆ จาก Oxidizing Acids		
ทนด่าง	ได้	ได้	ได้
ทนสารละลาย	ได้ถ้าต่ำกว่า 80 c		ถูกทำลายโดย Hydrocarbons

### 2.3 คอนกรีตผสมเส้นใย (Fiber Reinforced Concrete)

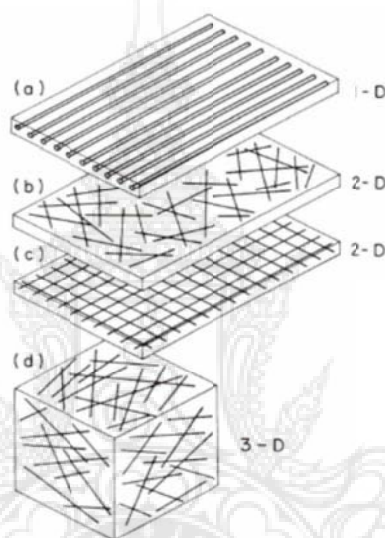
คอนกรีตถึงแม้จะมีกำลังการรับแรงอัดที่ดีแต่ก็จัดว่าเป็นวัสดุที่มีความเปราะ (Brittle Material) มีคุณสมบัติในด้านการรับแรงดึงที่ต่ำโดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 10 ของกำลังการรับแรงอัดการที่จะทำให้คอนกรีตมีความเหนียว (Ductility) นั้นจำเป็นต้องใส่วัสดุเสริมกำลังเข้าไปในเนื้อคอนกรีตเส้นใยถือว่าเป็นวัสดุที่นิยมนำมาผสมลงในคอนกรีตเพื่อเสริมคุณสมบัติด้อยดังกล่าวเป็นที่รู้จักกันในชื่อคอนกรีตผสมเส้นใยไฟเบอร์ FRC (Fiber Reinforced Concrete) ซึ่งคอนกรีตโดยทั่วไปที่มีการเติมเส้นใยที่มีลักษณะกระจายตัวออกจากกันแบบไม่ต่อเนื่องกัน (Discontinuous Discrete Fiber) เข้าไประหว่างการผสมทั้งเส้นใยไฟเบอร์ที่ได้จากธรรมชาติเช่นใยหินฟางข้าวป่านปอเป็นต้นหรือเส้นใยที่ได้

จากการสังเคราะห์เช่นเส้นใยเหล็กเส้นใยเซรามิกเส้นใยคาร์บอนเส้นใยไนลอนและเส้นใยโพลีพรอพิลีน เป็นต้น

2.3.1 โครงสร้างของคอนกรีตผสมเส้นใย (Fiber Reinforced Concrete) [8] ประกอบไปด้วย องค์ประกอบหลัก 2 ส่วนคือ

1. Matrix ได้แก่ มอร์ตาร์
2. Reinforcement ได้แก่ เส้นใย

สำหรับคอนกรีตผสมเส้นใย (Fiber Reinforced Concrete; FRC) จัดเป็นวัสดุผสมเส้นใยชนิดไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Fibrous Composite Material) คือเส้นใยที่ผสมลงไปจะมีการกระจายตัวไปในทิศทางที่ไม่แน่นอนอยู่ทั่วไปในเนื้อคอนกรีตดังแสดงในภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 การกระจายตัวของเส้นใยในลักษณะต่างๆ [8] (a) and (c) Continuous Reinforcement (b) Discrete, Short Fiber 2-D (d) Discrete, Short Fiber 3-D ที่มา; ปิติ (2549)

เนื่องจาก FRC เป็นวัสดุประกอบโดย Rapoport ได้ศึกษาคุณสมบัติของ FRC ภายใต้สภาวะการกระทำต่างๆทำให้ทราบถึงองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนดังนี้

2.3.1.1 โครงสร้างของ Matrix (The Structure of The Matrix) ใน FRC โครงสร้างของ Matrix จะหมายถึงมอร์ตาร์ซึ่งโดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติไม่แตกต่างจากคอนกรีตธรรมดาการผสมเส้นใยสำหรับ FRC โดยทั่วไปจะผสมไม่เกินร้อยละ 2

2.3.1.2 รูปร่างและลักษณะการกระจายตัวของเส้นใย (The Shape and Distribution of Fiber) เส้นใยที่นำมาใช้ผสมคอนกรีตที่นำมาออกแบบให้มีรูปร่างที่ต่างกันโดยเส้นใยที่มีรูปร่างต่างกันจะทำให้คุณสมบัติของ FRC ที่ได้แตกต่างกัน

2.3.1.3 ผิวสัมผัสระหว่าง Matrix และเส้นใย (The Structure of Matrix-Fiber Interface) นอกจากคุณสมบัติทั้ง 2 ข้อที่กล่าวมาแล้วนั้นผิวสัมผัสระหว่าง Matrix และเส้นใยถือว่าเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการศึกษาคุณสมบัติของ FRC เนื่องจากผิวสัมผัสจะมีผลโดยตรงกับค่าแรงยึด

เหนียว (Bonding) ระหว่าง Matrix และเส้นใยสำหรับปัจจัยที่มีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง Matrix และเส้นใยคือลักษณะรูปร่างและชนิดของเส้นใยเส้นใยบางชนิดอาจทำปฏิกิริยาทางเคมีกับซีเมนต์และอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพไปตามเวลาที่บริเวณผิวสัมผัส เช่นเส้นใยหิน (Asbestos) เป็นต้นโดยทั่วไปบริเวณรอบๆผิวของเส้นใยจะพบว่ามี ความพรุนมากกว่าบริเวณอื่นเนื่องจากมีช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการเฝ้มของคอนกรีตเมื่อน้ำหรือฟองอากาศเดินทางเข้าสู่ด้านบนหากมีเส้นใยกั้นอยู่จะทำให้ไปสะสมรอบๆเส้นใย

### 2.3.2 หลักการทำงานของเส้นใย

เมื่อ FRC ถูกแรงกระทำ Matrix จะเกิดการแตกร้าว (Cracking) จะมีการถ่ายเทแรงกระทำไปยังเส้นใยผ่านทางผิวสัมผัสหากแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัสดีเส้นใยก็จะรับแรงได้อย่างเต็มที่ซึ่งจะทำให้การแตกร้าวหยุดหรือไม่ขยายตัวแต่หากแรงกระทำภายนอกมีค่าสูงกว่ากำลังเส้นใยก็จะทำให้เส้นใยฉีกขาดโดยจะมีการวัดค่าประสิทธิภาพของเส้นใยด้วยค่าความดัดขึ้นความเหนียว (Toughness) ซึ่งค่าจะสูงหรือต่ำจะขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยด้วยแต่หากแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัสไม่ดีก็จะทำให้เส้นใยไม่ช่วยรับแรงอย่างเต็มที่ ซึ่งมีผลทำให้คาร์รับกำลังได้ต่ำด้วยเหตุผลนี้จึงได้มีการออกแบบรูปร่างและผิวสัมผัสของเส้นใยเป็นลักษณะต่างๆกัน ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์และเส้นใยซึ่งจะทำให้คอนกรีตมีความเหนียวขึ้นหรือดูดซับพลังงานได้ดีขึ้น ศึกษาแรงยึดเหนี่ยวของไฟเบอร์เส้นเดี่ยวบิดเกลียวที่ฝังในวัสดุประสานซีเมนต์ ทดสอบการถอนของไฟเบอร์เส้นเดี่ยวที่ฝังในวัสดุประสานซีเมนต์ได้ถูกใช้ทั่วไป ในการประเมินแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฟเบอร์กับวัสดุประสานซีเมนต์การยึดเกาะและการเสียดทานเป็นส่วนประกอบพื้นฐานของการยึดเหนี่ยวไฟเบอร์เหล็กที่เป็นเส้นตรง ขณะที่การดัดงอไฟเบอร์ให้เป็นเส้นตรงทำให้เกิดรูปทรงไฟเบอร์ชนิดใหม่ๆ เช่น ไฟเบอร์คริม ไฟเบอร์ตะขอ และไฟเบอร์เส้นเดี่ยวบิดเกลียว การดัดงอนี้ทำให้เกิดส่วนประกอบของแรงยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น คือ การยึดเหนี่ยวทางกลจากพฤติกรรมถอนของไฟเบอร์เส้นเดี่ยวบิดเกลียวขณะที่ไฟเบอร์ถูกถอนออกจากวัสดุประสานซีเมนต์ โดยแรงถอนทั้งหมดจากตัวอย่างประกอบด้วยแรงเสียดทานและแรงยึดเหนี่ยวทางกล ทั้งนี้แรงยึดเหนี่ยวทางกลได้เกิดจากสันเกลียวไฟเบอร์สัมผัสกับวัสดุประสานซีเมนต์ขณะถอนซึ่งทำให้เกิดจากบิดกลับของไฟเบอร์

### 2.3.3 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใย

2.3.3.1 ความสามารถในการเทได้ (Workability) การผสมเส้นใยลงในคอนกรีตมีผลให้ความสามารถในการเทคอนกรีตลดลงตามปริมาณการใส่ที่สูงขึ้นการศึกษาเปรียบเทียบคอนกรีตธรรมดากับคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กพบว่า การใส่เส้นใยเหล็กลงในคอนกรีตมีผลทำให้ค่าการยุบตัวลดลง

2.3.3.2 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) โดยทั่วไปแล้วการผสมเส้นใยลงในคอนกรีตไม่ได้มีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดโดยตรง แต่อาจมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเล็กน้อยสำหรับเส้นใยเหล็กอาจทำให้กำลังอัดสูงขึ้นได้มากถึงร้อยละ 25 แต่ถ้าใช้ในปริมาณมาก

เกินไปจะมีผลทำให้กำลังอัดลดลง เนื่องจากปริมาณเส้นใยที่มากมีผลทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ต่ำกว่าอัดแน่นจึงทำได้ยาก



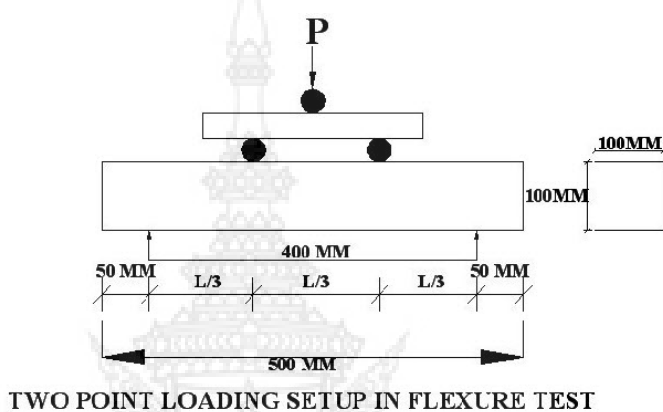
ภาพที่ 2-7 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 39

2.3.3.3 กำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) การผสมเส้นใยลงในคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในด้านกำลังรับแรงดึงดีขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากตัวเส้นใยมีความเหนียวและรับแรงดึงได้ดีกว่าคอนกรีตในสถานะที่แรงดึงกระทำกับคอนกรีตเกิดการแตกร้าว หน้าที่ของเส้นใยไฟเบอร์คือยับยั้งการขยายตัวของรอยแตกสำหรับการผสมเส้นใยลงในคอนกรีตจะทำให้กำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การเรียงตัวของเส้นใยมีผลมากกับกำลังรับแรงดึงหากเส้นใยเรียงตัวอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางการรับแรงดึงอาจสูงถึงร้อยละ 133 สำหรับการผสมเส้นใยชนิดตรงในปริมาณร้อยละ 5



ภาพที่ 2-8 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงผ่า (Splitting tensile Strength) ASTM C 496

2.3.3.4 กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) การผสมเส้นใยลงในคอนกรีตจะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตสูงขึ้นมากกว่าการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังอัดและกำลังดึงทั้งนี้ยังคง พบว่าค่ากำลังดัดเพิ่มขึ้นมากถึงร้อยละ 100 และการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (Aspect Ratio) จะทำให้ค่ากำลังดัดสูงขึ้นซึ่งความสามารถในการรับแรงดึงและแรงดัดจะดีขึ้นมากเท่าใดขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ เช่น การเรียงตัวของเส้นใยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสของเส้นใยกำลังของซีเมนต์เพสต์รวมทั้งชนิดของเส้นใยรูปร่างของเส้นใยและปริมาณเส้นใยที่ใช้ในการผสม เป็นต้น

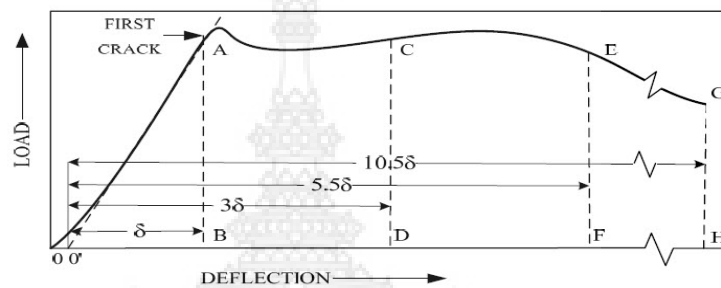


ภาพที่ 2-9 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 78

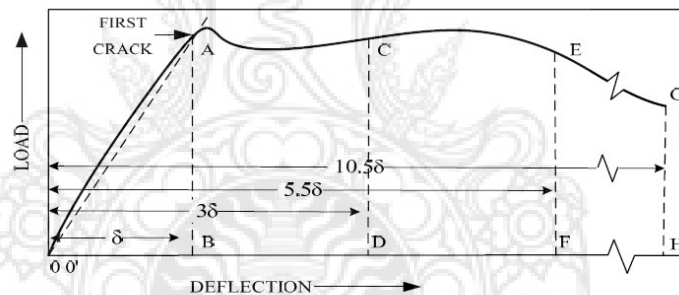
2.3.3.5 ความเหนียว (Toughness) และการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption) จุดประสงค์หลักของการผสมเส้นใยลงในคอนกรีตก็คือ การยืดรั้วรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของคอนกรีตภายใต้แรงกระทำซึ่งถ้าเส้นใยมีค่ากำลังรับแรงและมีแรงยึดเหนี่ยวกับ Matrix ที่เพียงพอจะทำให้ความสามารถยับยั้งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นหรือทำให้คอนกรีตยังคงรับแรงอยู่ได้ในขณะที่ค่าความเครียดเพิ่มขึ้นหรือเรียกว่าความเหนียว (Ductility) การวัดค่าความเหนียวมีวิธีที่ใช้กันส่วนใหญ่คือ Flexural Toughness โดยวัดจากพื้นที่ใต้ กราฟของ Complete Load-Deflection Curve in Flexure ค่าที่ได้ก็คือค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการ ทำให้ก้อนคอนกรีตแตกหักหรือเรียกว่าการดูดซับพลังงานมาตรฐานการวัดค่าความเหนียวสามารถวัดได้มี 2 วิธีคือ ASTM C 1018 และ JSCE SF-4 โดยวิธีแรกจะเป็นค่าดัชนีความเหนียว(พื้นที่ใต้กราฟที่ค่า Deflection ของจุดที่พิจารณาจะเป็นที่เท่าของพื้นที่ใต้กราฟที่เกิด (First Crack) สำหรับวิธี JSCE SF-4 จะวัดค่าที่จุดๆเดียวและเนื่องจากเส้นใยแต่ละชนิดจะมีพฤติกรรมภายหลังจากการเกิด First Crack ที่แตกต่างกันดังนั้นวิธีที่สองนี้จะมีข้อด้อยตรงที่ไม่สามารถบอกพฤติกรรมของ FRC ได้ครบโดยจะแสดงค่าเพียง Toughness Factor เพียงค่าเดียวซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายกว่ามาตรฐานของ ASTM การคำนวณโดยวิธีของมาตรฐาน ASTM C 1018-97 เริ่มต้นจากปรับค่าความชันของ กราฟใหม่เพื่อจะได้ค่าระยะการแตกร้าวที่ถูกต้องที่สุดตามลักษณะของแต่ละผลการทดลองที่ไม่เหมือนกันดังแสดงในภาพที่ 2-8 จากนั้นนำกราฟระหว่างแรงดัดและการโก่งตัวของคานที่ปรับแก้แล้วโดยแบ่งออกเป็น 4 ช่วงตามตำแหน่งของการโก่งที่ได้กำหนดเอาไว้ดังนี้คือการโก่งตัว ณ ตำแหน่งสิ้นสุดช่วงยึดของคาน  $3\delta$ ,  $5.5\delta$  และ  $10.5\delta$  คือการโก่งตัวที่



ระยะ 3, 5.5 และ 10.5 เท่าของ  $\delta$  ตามลำดับจากนั้นคำนวณหา Toughness จากพื้นที่ใต้กราฟตั้งแต่จุดเริ่มต้นที่ยังไม่มีการปล่อยน้ำหนักกระทำจนถึงตำแหน่งของการโก่งตัวที่จุด  $3\delta$ ,  $5.5\delta$  และ  $10.5\delta$  ตามลำดับพื้นที่ OAB เป็นค่า Toughness ณ ตำแหน่งสิ้นสุดช่วงยืดของคาน ( $\delta$ ) พื้นที่ OACD เป็นค่า Toughness ณ ตำแหน่ง 3 เท่า ( $3\delta$ ) ของจุดสิ้นสุดช่วงยืดของคานไปแล้วพื้นที่ OAEF เป็นค่า Toughness ณ ตำแหน่ง 5.5 เท่า ( $5.5\delta$ ) ของจุดสิ้นสุดช่วงยืดของคานไปแล้วพื้นที่ OAGH เป็นค่า Toughness ณ ตำแหน่ง 10.5 เท่า ( $10.5\delta$ ) ของจุดสิ้นสุดช่วงยืดของคานไปแล้ว



(a) Concave upwards to first crack



(b) Convex upwards to first crack

ภาพที่ 2-10 แสดงตำแหน่งการโก่งตัวของ การทดสอบมาตรฐาน ASTM C 1018  
ที่มา; ปีติ (2549)

พื้นที่ใต้กราฟที่ได้จะถูกนำมาคำนวณหาค่าดัชนีความเหนียว (Toughness Indices)  $I_5$ ,  $I_{10}$  และ  $I_{20}$  ดังแสดงในสมการด้านล่าง

$$I_5 = \text{พื้นที่ OACD} / \text{พื้นที่ OAB} \quad (2-1)$$

$$I_{10} = \text{พื้นที่ OAEF} / \text{พื้นที่ OAB} \quad (2-2)$$

$$I_{20} = \text{พื้นที่ OAGH} / \text{พื้นที่ OAB} \quad (2-3)$$

ค่าดัชนีความเหนียวทั้ง  $I_5$ ,  $I_{10}$  และ  $I_{20}$  จะบอกให้ทราบถึงระดับความเหนียวของคานที่โก่งตัวน้อยปานกลางและจนถึงมากตามลำดับ



จากการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กและพลาสติกสังเคราะห์ ที่มีสัดส่วนผสมร้อยละ 1 และร้อยละ 2 โดยปริมาตรและทำการวัดค่าความเหนียว(Toughness) ตามมาตรฐาน ASTM C1018 พบว่าเส้นใยมีผลทำให้คอนกรีตมีค่าความเหนียวและการดูดซับพลังงานดีขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา สำหรับค่าที่เพิ่มนั้นเริ่มตั้งแต่หลังการแตกร้าวครั้งแรกกำลังจะตกลงอย่างรวดเร็วจากนั้นค่าการรับกำลังจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยเริ่มยึดตัวออกเล็กน้อยจึงเกิดแรงยึดเหนี่ยวประสานของเส้นใยบริเวณที่เกิดรอยร้าวมีผลทำให้ทั้งกำลังและการดูดซับพลังงานเพิ่มมากขึ้น

## 2.4 คุณสมบัติของโพลิพรอพิลีนต่อคอนกรีต

เส้นใยโพลิพรอพิลีนมีประโยชน์ต่อคอนกรีตทั้งคอนกรีตที่อยู่ในช่วงก่อนแข็งตัวและช่วงที่คอนกรีตแข็งตัวไปแล้ว อาทิเช่น

- ช่วยลดรอยแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวของคอนกรีตขณะที่ยังอยู่ในสภาวะพลาสติก
- ช่วยลดรอยแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวของคอนกรีตขณะที่ยังอยู่ในสภาวะพลาสติก
- ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำต่ำลง
- เพิ่มความต้านทานต่อการรับแรงกระแทกและการสึกกร่อน
- ต้านทานต่อการแตกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยของคอนกรีตได้

ซึ่งเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดสามารถใช้เพื่อเพิ่มแรงดึงและแรงยึดเหนี่ยวให้กับคอนกรีต นอกเหนือจากการเสริมเหล็กได้

### 2.4.1 หน้าที่โพลิพรอพิลีนในสภาวะอายุ คอนกรีตเริ่มต้น

การเปลี่ยนแปลงปริมาตรในช่วงอายุเริ่มต้นของคอนกรีตเป็นสาเหตุที่ทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตอ่อนแอและเกิดรอยร้าวขึ้น เนื่องจากแรงเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้นมีเกิดมีมากกว่ากำลังที่คอนกรีตจะรับได้ในขณะนั้น รอยแตกร้าวที่มีขนาดเล็กจะถูกหยุดการขยายตัวโดยคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยโพลิพรอพิลีน อีกทั้งเส้นใยสังเคราะห์ยังช่วยยับยั้งการพัฒนารอยแตกร้าวจากการหดตัวของคอนกรีตเส้นใยโพลิพรอพิลีนที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอจะช่วยลดการเกิดโพรงอากาศที่เรียงตัวต่อเนื่องในทิศทางเดียวกัน (Capillary Pores) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการคายน้ำขึ้นมาบนผิวหน้าของคอนกรีตสด โดยเส้นใยโพลิพรอพิลีนจะช่วยให้ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำต่ำลง ส่งผลให้ช่วยลดการเกิดรอยแตกร้าวแบบพลาสติก รวมทั้งสามารถลดการเยิ้ม (Bleeding) ของคอนกรีตสดลงได้

### 2.4.2 หน้าที่โพลิพรอพิลีนในสภาวะอายุ คอนกรีตแข็งตัวแล้ว

การใช้เส้นใยโพลิพรอพิลีนไม่ใช่จะได้ประโยชน์กับคอนกรีตในสภาวะอายุเริ่มต้น เท่านั้น แต่ยังมีส่วนทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วดีขึ้นด้วย โดยคอนกรีตที่ผสมเส้นใยโพลิพรอพิลีนจะมีคุณสมบัติในการลดการซึมผ่านของน้ำ เพิ่มความทนทานต่อการขีดสีและต้านทานการแตกร้าวจากแรงกระแทก ความสามารถในการต้านทานต่อการแตกร้าวจากแรงกระแทกจะถูกปรับปรุงเพิ่มขึ้นอย่างมากจากเหตุผลที่ได้กล่าวข้างต้นมาแล้ว โดยสังเกตจากคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมเส้นใยโพลิพรอพิลีนเมื่อได้รับแรงอัดจะชำรุดและแตกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยตามแนวที่เริ่มแตกร้าว

ส่วนคอนกรีตที่ผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนจะสามารถป้องกันผลกระทบจากการแตกละเอียด เนื่องจากเส้นใยที่ผสมอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตจับตัวกันอย่างซับซ้อนและเหนียวแน่น

คุณสมบัติการต้านทานต่อการขีดข่วนที่ดีขึ้นของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนนั้น เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) บริเวณผิวหน้าของคอนกรีตจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นมาจากเนื้อ คอนกรีตสด การผสมเส้นใยสังเคราะห์จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตสดทำให้การเยิ้ม เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวหน้าของคอนกรีต

เส้นใยสังเคราะห์บางประเภทสามารถใช้เพื่อทดแทนเหล็กเสริมรับการแตกร้าว เนื่องจากอุณหภูมิได้ แต่ควรได้รับการยืนยันจากผู้ผลิต การกระจายตัวของเส้นใยสังเคราะห์จะต้องมีความสม่ำเสมอเพื่อให้แน่ใจว่า สามารถกระจายแรงได้อย่างทั่วถึง

## 2.5 คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber Reinforced Concrete)

คอนกรีตมีความสามารถในการรับกำลังรับแรงอัดที่ดี แต่ก็จัดว่าเป็นวัสดุที่มีความเปราะ (Brittle Material) มีคุณสมบัติในด้านการรับแรงดึงต่ำ โดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 10 ของกำลังรับแรงอัด การที่จะทำให้คอนกรีตรับแรงดึงได้ดีหรือมีความเหนียว (Ductility) นั้น จำเป็นต้องใส่วัสดุเสริมกำลังเข้าไปในเนื้อคอนกรีต โดยวัสดุจำพวกเส้นใยถือว่าเป็นวัสดุที่นิยมนำมาผสมลงในคอนกรีตเพื่อเสริมคุณสมบัติดังกล่าว เป็นที่รู้จักกันในชื่อ คอนกรีตผสมใยหรือ Fiber Reinforced Concrete (FRC) ดังแสดงในรูปภาพที่2-11

โดยคอนกรีตทั่วไปที่มีการเติมเส้นใยที่มีลักษณะกระจายตัวออกจากกันแบบไม่ต่อเนื่องกัน (Discontinuous Discrete Fiber) เข้าไประหว่างการผสม ทั้งเส้นใยไฟเบอร์ ที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ใยหิน ฟางข้าว ป่าน ปอ เป็นต้น เส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น เส้นใยเหล็ก เส้นใยเซรามิก เส้นใยคาร์บอน เส้นใยไนลอน และเส้นใยโพลี เป็นต้น

### 2.5.1 โครงสร้างของคอนกรีตผสมใยเหล็ก (structure of Fiber Reinforced Concrete)

ประกอบไปด้วยองค์ประกอบ หลัก 2 ส่วน คือ Matrix และมอร์ต้า Reinforcement ได้แก่ เส้นใยสำหรับคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber Reinforced Concrete ; SFRC) จัดเป็นวัสดุประกอบผสมเส้นใยชนิดไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Fiber Composite Material) คือ เส้นใยที่ผสมลงไปจะมีการกระจายตัวไปในทิศทางที่ไม่แน่นอนอยู่ทั่วไปในเนื้อคอนกรีต



ภาพที่ 2-11 แสดงลักษณะรูปร่างของเส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย

เนื่องจากคอนกรีตผสมเส้นใย เป็นวัสดุประกอบ ดังนั้นการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใย ภายใต้สภาวะแรงกระทำต่าง ๆ จำเป็นต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนดังนี้

(1) โครงสร้างของมอร์ตาร์ (Structure of the Matrix) ในคอนกรีตผสมเส้นใยหมายถึงมอร์ตาร์ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติไม่แตกต่างจากคอนกรีตธรรมดา การผสมเส้นใยโดยทั่วไปจะผสมไม่เกินร้อยละ 2

(2) รูปร่างและลักษณะการกระจายตัวของเส้นใย (Shape and Distribution of the Fiber) เส้นใยที่นำมาใช้ผสมคอนกรีตนั้นมีการออกแบบให้มีรูปร่างที่ต่างกัน โดยเส้นใยที่มีรูปร่างต่างกันจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใยหลักที่ได้ออกมาแตกต่างกัน

(3) ผิวสัมผัสระหว่าง Matrix และเส้นใย (Structure of the Matrix-Fiber Interface) ผิวสัมผัสระหว่างมอร์ตาร์กับเส้นใย ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญมากในการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใย เนื่องจากผิวสัมผัสจะมีผลโดยตรงกับค่าแรงยึดเหนี่ยว (Bonding) ระหว่าง Matrix กับเส้นใยสำหรับปัจจัยที่มีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัส Matrix กับเส้นใย คือลักษณะรูปร่างและชนิดของเส้นใย เส้นใยบางชนิดอาจจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับซีเมนต์และอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพไปตามบริเวณผิวสัมผัส เช่น เส้นใยหิน (Asbestos) เป็นต้น โดยทั่วไปบริเวณรอบๆ ผิวของเส้นใยจะพบว่ามีสภาพพรุนมากกว่าบริเวณอื่นเนื่องจากมีช่องว่างที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเชื่อมของคอนกรีตเมื่อมีฟองเดินทางขึ้นสู่ด้านบนหากมีเส้นใยกั้นอยู่จะทำให้ไปสะสมรอบ ๆ เส้นใย

### 2.5.2 หลักการทำงานของเส้นใย

เมื่อคอนกรีตผสมเส้นใยถูกแรงกระทำมอร์ตาร์จะเกิดการแตกร้าว (Cracking) จะมีการถ่ายเทแรงกระทำไปยังเส้นใยทางผิวสัมผัส หากแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัสดี เส้นใยก็จะรับแรงได้อย่างเต็มที่ซึ่งจะทำให้การแตกร้าวหยุดหรือไม่ขยายตัว แต่หากแรงกระทำภายนอกมีค่าสูงกว่ากำลังที่เส้นใยจะรับได้ก็จะทำให้เกิดการยึดตัวจนขาดออก ซึ่งโดยปกติกำลังของคอนกรีตผสมเส้นใยจะเป็นค่าความเหนียว (Toughness) ซึ่งค่าจะสูงหรือต่ำจะขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยด้วย แต่หาแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัสไม่ดีก็จะทำให้เส้นใยรับแรงไม่เต็มที่ ซึ่งมีผลให้ค่ากำลังที่ได้ต่ำ ด้วยเหตุผลนี้จึงได้มีการออกแบบรูปร่างและผิวสัมผัสของเส้นใยเป็นลักษณะต่าง ๆ กัน ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เฟสและเส้นใยซึ่งจะทำให้คอนกรีตมีความเหนียวขึ้นหรือดูดซับพลังงานได้ดีขึ้น

## 2.6 ดินขาว (Metakaolin)

ดินขาว หรือ Metakaolin ได้จากการนำดินขาวดิบหรือ Kaolin ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติมาเผาในช่วงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมโดยทั่วไปมีสถานะของผลึกเป็นอัยรูป (Amorphous) มีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือชมพูขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุหลักที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปมีซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นหลักดินขาวมีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มากโดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1.5 ไมครอน (Balaguru, 2001) ดินขาวจัดเป็นสารปอซโซลาน Class N Raw or Calcined Pozzolans ตามมาตรฐาน ASTM C 618 เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำจะเกิด

สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ; CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ( $3\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ; CAH) ที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานและให้กำลังแก่คอนกรีต นอกจากปฏิกิริยาเคมี (Pozzolanic Reaction) ที่เกิดขึ้นแล้วดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตทางด้านกายภาพอีกด้วยโดยอนุภาคของดินขาวช่วยลดความพรุน (Porosity) ในเนื้อคอนกรีตโดยอนุภาคของดินขาวที่มีขนาดเล็กเข้าไปแทรกช่องว่างระหว่างอนุภาคซีเมนต์ (Microfiller Effect) ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้นดังนั้นการใช้ดินขาวผสมในคอนกรีตมีผลในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในด้านกำลัง (Strength) และความทนทาน (Durability)

### 2.6.1 การปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบด้วยความร้อน

คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวดิบ ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_3(\text{OH})_4$ ) จะแตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติการนำดินขาวดิบมาผสมกับคอนกรีตโดยตรงอาจทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติที่ไม่แน่นอนจากผลการวิจัยของ Sayamipuk (2543) พบว่ามอร์ต้าผสมดินขาวดิบจากแหล่งในประเทศไทยที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนให้กำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าควบคุม ในขณะที่มอร์ต้าที่ผสมดินขาวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น

การปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนโดยการนำดินขาวดิบมาผ่านกระบวนการเผาเพื่อเป็นการปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมีทำให้โครงสร้างภายในมีการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นดินขาว ( $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$  ;  $\text{AS}_2$ ) ซึ่งมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้ผสมกับคอนกรีต

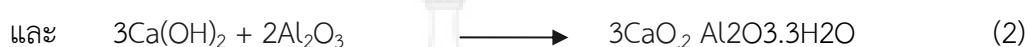
อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาดินขาวดิบมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินขาว โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 650 ถึง 850 องศาเซลเซียส (Nevill, 1996) และจากผลการวิจัยของ Murat and Comel (1983) ที่ทำการศึกษาวีธีการและอุณหภูมิในการเผาดินขาวดิบ โดยทำการทดลองเผาดินขาวดิบด้วยวีธีการเผาแบบถ้งนิ่ง (Fixed-Bed) และแบบถ้งกวน (Stirred-Bed) หรือการเผาแบบหม้อหมุน (Rotary Klin) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาสำหรับทั้ง 2 วิธี อยู่ในช่วง 700 - 850 องศาเซลเซียสสำหรับวีธีการเผาแบบถ้งนิ่งเวลาที่เหมาะสมคือ 6 ชั่วโมงซึ่งให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของดินขาวผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำที่อายุการบ่มระหว่าง 7 - 90 วันสูงกว่ากำลังอัดของดินขาวจากวีธีการเผาแบบถ้งกวนซึ่งเวลาที่เหมาะสมในการเผาคือ 3 ชั่วโมง

สำหรับในประเทศไทยมีรายงานในการศึกษาถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาดินขาวดิบโดยศึกษาศักยภาพและเงื่อนไขที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินขาวดิบในประเทศไทยจาก 3 แหล่งได้แก่ แหล่งปราจีนบุรีระนองและลำปางโดยนำดินขาวดิบมาเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 700, 800, 900 และ 1,000 องศาเซลเซียสและแปรผันเวลาในการเผา คือ 4, 6 และ 8 ชั่วโมงจากการทดลองเมื่อพิจารณาจากค่าดัชนีกำลัง (Strength Activity Index) ของมอร์ต้าผสมดินขาวที่ได้จากการเผาพบว่าวีธีการปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับดินขาวดิบทั้ง 3 แหล่งคือเผาด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมงโดยมอร์ต้าที่ผสมดินขาวจากแหล่งจังหวัดปราจีนบุรีให้ค่าดัชนีกำลังสูงที่สุดร้อยละ 131 เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าที่ผสมดินขาวจากแหล่งจังหวัดระนองและลำปางที่ให้ค่าดัชนีกำลังร้อยละ 115 และ 100 ตามลำดับ นอกจากนี้ได้ศึกษาดินขาวดิบจากแหล่งจังหวัดลำปางโดยนำดินขาวดิบที่ผ่านการล้าง (Washed Kaolin) และดินขาวดิบที่ผ่านการบด (Crushed Kaolin) มาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสพบว่ากำลังต้านทานแรงอัดของ

ซีเมนต์มอร์ต้าผสมดินขาวที่ได้จากการเผาดินขาวดิบที่ผ่านการล้างมีค่าสูงกว่าดินขาวดิบบดร้อยละ 6.4 และได้ทำการทดลองหาอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมโดยแปรผันอุณหภูมิที่ 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียสพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาคือ 800 องศาเซลเซียส

### 2.6.2 ปฏิกริยาปอซโซลานิก

ปฏิกริยาปอซโซลานิกเป็นปฏิกริยาขั้นที่ 2 เกิดจากการทำปฏิกริยาของซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ที่เป็นสารประกอบหลักในดินขาวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกริยาไฮเดรชันของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียม-อะลูมิเนตไฮเดรตในเนื้อคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นการเกิดปฏิกริยาปอซโซลานิกสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้



ผลของการเกิดปฏิกริยาปอซโซลานิกทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (CSH , CAH) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้น ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติต้านกำลังการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และความทนทานเป็นต้น

มีรายงานการศึกษาระบุว่าปริมาณดินขาวที่ใช้เพื่อทำปฏิกริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จนหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 15 - 20 โดยปริมาณที่ใช้จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของดินขาว, พื้นที่ผิวจำเพาะของดินขาวและปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกริยาไฮเดรชันนอกจากนี้ยังมีรายงานว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และดินขาวในปริมาณร้อยละ 30 - 40 สามารถทำปฏิกริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จนหมดภายในเวลา 28 วัน

ผลการศึกษาของพบว่าเมื่อพื้นที่ผิวจำเพาะของดินขาวเพิ่มขึ้นจาก 12,000 ตารางเมตรต่อกิโลกรัมเป็น 15,000 ตารางเมตรต่อกิโลกรัมจะช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกริยาปอซโซลานิกโดยค่ากำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่เพิ่มสูงขึ้นไม่มีผลต่อกำลังอัดในระยะยาว (90 วัน)

### 2.6.3 ผลกระทบของดินขาวต่อกำลังของคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวจะให้ค่ากำลังอัดที่ระดับหนึ่งแต่เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานาร่วมผสมในคอนกรีตทั้งโดยวิธีการแทนที่ปูนซีเมนต์ (Replacement Method) หรือวิธีผสมเพิ่มเข้าไปในส่วนผสมของคอนกรีต (Addition Method) ในสัดส่วนที่เหมาะสมจะทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้นความแตกต่างของกำลังที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารปอซโซลานานั้นๆ

ศึกษาผลกระทบของดินขาวต่อการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตโดยแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวในปริมาณร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนักและทำการบ่มในช่วงอายุ 1 - 90 วันคอนกรีตที่ผสมดินขาวมีกำลังต้านทานแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมในทุกปริมาณของการแทนที่และทุกช่วงอายุของการบ่มโดยปริมาณของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 20 และสรุปว่าการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวเกิดจากผลของ Microfiller Effect

ซึ่งจะเกิดขึ้นทันทีหลังจากผสมดินขาวลงในคอนกรีตและผลของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นชัดเจนที่สุดในช่วง 7 - 14 วันแรกนอกจากนี้ดินขาวยังมีส่วนช่วยในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตในช่วง 24 ชั่วโมงแรกหลังจากการผสม

## 2.7 วัสดุเถ้าลอย (Fly ash)

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอยได้จากการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้าถ่านหิน โดยเถ้าลอยจะถูกดักจับเก็บไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล เถ้าลอยมีสีเทาดำหรือน้ำตาลมีส่วนประกอบหลักเป็นอัยรูปของซิลิกาและอลูมินาสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์กับน้ำได้สารประกอบที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) อลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เหล็กออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) เป็นต้น

ได้มีการศึกษาคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงสำหรับใช้ในงานโครงสร้างครั้งแรกโดย The Canadian Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET) ในปลายทศวรรษ 1980 s (Malhotra, 1986) คอนกรีตชนิดนี้มีส่วนผสมเถ้าลอยมากกว่าซีเมนต์โดยน้ำหนักและปกติจะผสมที่อัตราส่วน W/B ประมาณ 0.3 กำลังของคอนกรีตในระยะต้นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้และมีการพัฒนากำลังและโมดูลัสความยืดหยุ่นในระยะหลังมากขึ้น มีการหดตัวแห้ง (drying shrinkage) และการล้า (creep) ต่ำและมความทนทานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ปกติ (Langley et al., 1989; Carette et al., 1993; Bilodeau et al., 1994; Bisailon et al., 1994) เชื่อกันว่าในการผสมเถ้าลอยมากกว่า 50% โดยน้ำหนัก เถ้าลอยจะมีส่วนสำคัญในการเชื่อมประสาน (Berry et al., 1994) เถ้าลอยเป็นที่รู้จักในฐานะวัสดุปอซโซลานิกโดยตัวเถ้าลอยเองแล้วมีคุณสมบัติน้อยหรือไม่มีคุณสมบัติทางการเชื่อมประสาน (ASTM 618-94a, 1995) และไม่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้โดยตรงซึ่งโดยทั่วไปแล้วการใช้เถ้าลอยในคอนกรีตในงานโครงสร้างมักนิยมใช้แทนที่ซีเมนต์ในช่วง 15% ถึง 25% (ACI Committee 211, 1993; Berry et al., 1994) แต่เมื่อมีการใช้เถ้าลอยปริมาณที่สูงจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในการพัฒนากำลังและปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยทั่วไปปริมาณเถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตสำหรับใช้ในงานโครงสร้างจะจำกัดประมาณ 20 ถึง 25% ของวัสดุประสาน (Zhang, 1995) มาตรฐานในหลายประเทศยังคงจำกัดปริมาณมากที่สุดของเถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตสำหรับงานโครงสร้างประมาณ 20 ถึง 25% ซึ่งในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงปฏิกิริยาปอซโซลานิกอาจจะยังคงเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์เนื่องจากปริมาณเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนสูงเมื่อเทียบกับซีเมนต์ ซึ่งเถ้าลอยบางส่วนอาจยังคงอยู่ในสภาพเดิมโดยไม่ทำปฏิกิริยาถึงแม้เป็นระยะหลังการบ่มเป็นเวลานาน (Zhang, 1995)

Feldman et al. (1990) พบว่าในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง เถ้าลอยจะเริ่มทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)<sub>2</sub> ในช่วง 3 ถึง 7 วัน แต่ยังคงมีปริมาณ Ca(OH)<sub>2</sub> และเถ้าลอยจำนวนมากที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาหลัง 91 วัน ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยาอยู่ในรูปของ calcium silicate hydrate (C-S-H) และมีอัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกา (c/s) ที่ต่ำ

Berry et al. (1990) ศึกษากลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันในเพสต์ที่ใช้เถ้าลอยปริมาณสูงแทนที่ซีเมนต์ โดยทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพด้านกำลังอัดของมอร์ต้า ทางรูปร่าง (morphology) โดยการใช้วิธี SEM ส่วนประกอบของส่วนของแข็ง (solid-phase) และระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยการใช้วิธี XRD และการวิเคราะห์ทางด้านอุณหภูมิจาก (thermal analysis) และส่วนประกอบของ pore fluid โดยวิธี high-pressure extraction พบว่าในระบบเถ้าลอยปริมาณสูง (high-volume fly ash system) ทั้งปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีมีผลกระทบต่อความแน่น (density) และแรงยึดเหนี่ยวในเพสต์ ในช่วงต้นผลกระทบทางด้านกายภาพโดยการอุดตันช่องว่างและทางเคมีโดยมีผลต่อการเกิด ettringite หรือการเกิด sulphoaluminate เป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนากำลัง ในระยะยาวปฏิกิริยาไฮเดรชันมีอิทธิพลจากการเกิด silico-aluminate binder ที่เกี่ยวพันจากปฏิกิริยากับเถ้าลอย Sivasundaram et al. (1989) ศึกษาการก่อตัวเริ่มต้น (initial setting time) และการก่อตัวสุดท้าย (final setting time) ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง โดยมี W/C หรือ W/B เดียวกันพบว่า การก่อตัวเริ่มต้นสามารถเปรียบเทียบกันได้กับคอนกรีตควบคุมคือ 7.5 ชั่วโมง ในขณะที่การก่อตัวสุดท้ายถูกหน่วงให้ช้ากว่าคอนกรีตควบคุมประมาณ 3 ชั่วโมง Sivasundaram et al. (1991) รายงานว่าการหน่วงระยะเวลาก่อตัวสามารถเกิดขึ้นได้กับคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงที่ผสมจากเถ้าลอยบางชนิด และการหน่วงระยะเวลาก่อตัวยังสัมพันธ์กับความเข้ากันได้ (compatibility) ระหว่างวัสดุประสานและ superplasticizer และเมื่อใช้ superplasticizer ในปริมาณสูงอาจทำให้เกิดการหน่วงระยะเวลาก่อตัวได้

Carette et al. (1995) ศึกษาโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณสูงเปรียบเทียบกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติที่มีกำลังเท่ากัน พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงมีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติ โดยโมดูลัสความยืดหยุ่นที่สูงของอนุภาคเถ้าลอยทำให้เพสต์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณสูงมีโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มากกว่าเพสต์ของคอนกรีตที่ไม่มีการผสมเถ้าลอยและอนุภาคของเถ้าลอยยังปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคในเพสต์ให้ดีขึ้นโดยอนุภาคของเถ้าลอยทำหน้าที่เป็นมวลรวมขนาดเล็ก (microaggregate) ที่มีโมดูลัสความยืดหยุ่นที่สูงกว่า matrix ของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Zhang, 1995)

Jiang (1999) ศึกษา interfacial zone และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง พบว่าหลังคอนกรีตอายุ 28 วันไม่มี transition zone ระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ให้เห็นอย่างชัดเจน และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและเพสต์ขึ้นกับกำลังของเพสต์ โดยเพสต์ที่มีกำลังสูงจะให้แรงยึดเหนี่ยวที่สูงตามไปด้วย

Atis (2001) ศึกษาความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณสูงโดยวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตภายใต้สภาวะการบ่มแบบ adiabatic พบว่าความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในเถ้าลอยคอนกรีตขึ้นกับระดับการแทนที่ซีเมนต์ของเถ้าลอยและปริมาณ Superplasticizer ที่ใช้เพื่อรักษาความสามารถในการทำงานได้ การใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ทำให้ลดระดับอุณหภูมิสูงสุดและเมื่อเพิ่มระดับการแทนที่ของเถ้าลอยยังเป็นการลดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นและ Superplasticizer สามารถชะลอระยะเวลาที่จะเกิดอุณหภูมิสูงสุดโดยคอนกรีตที่มีส่วนผสมเหมือนกันแสดงอุณหภูมิสูงสุดที่เท่ากันโดยไม่ขึ้นกับการใส่ superplasticizer

Lane and Best (1978) ศึกษาผลกระทบของการใช้ Superplasticizer ร่วมกับเถ้าลอยในคอนกรีต และได้สรุปว่า superplasticizer มีความเข้ากันได้กับเถ้าลอย โดยสามารถใช้ร่วมกันได้โดยไม่เกิดผลเสียใน

คอนกรีต โดยเปอร์เซ็นต์การลดน้ำในคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีค่าความยุบตัวเท่ากันมีค่าไม่เกิน 15% ปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านการลดน้ำมากกว่าสารลดน้ำมาตรฐานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยให้เปอร์เซ็นต์การลดน้ำที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติที่มีความชื้นเหลวเท่ากัน เนื่องจากในความชื้นเหลวเท่ากันคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีน้ำส่วนเกินที่น้อยกว่าดังนั้นการเติมสารลดน้ำเพื่อนำน้ำส่วนเกินนี้มาใช้จึงมีผลกระทบต่อที่น้อยกว่า

ประจิต (2526) ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะผสมกับคอนกรีต และศึกษากำลังรับแรงอัด โดยใช้อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณ 0 ถึง 50% อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เป็น 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 ตามลำดับจากการทดลองพบว่าสามารถเติมเถ้าลอยเข้าไปในคอนกรีตเพื่อทดแทนซีเมนต์ได้ถึง 25 และ 29% ในคอนกรีตอายุ 28 วัน และ 45 วัน ตามลำดับโดยคอนกรีตยังให้กำลังเท่าเดิม

ปริญญาและอินทรชัย (2528) พบว่ากำลังอัดระยะแรกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าลดลงตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเวลาผ่านไปกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะดีขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและเสนอปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมในช่วง 0 ถึง 40% ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นชดเชยปฏิกิริยาของซีเมนต์ที่ถูกเถ้าลอยแทนที่ได้มีการศึกษาการใช้เถ้าลอยแม่เมาะเพื่อปรับปรุงความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสด และมีรายงานว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะช่วยปรับปรุงความสามารถในการเทได้เพิ่มขึ้น แต่มีผลในการลดกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในคอนกรีตผสมเถ้าลอยประกอบด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ของซิลิกาออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์จากเถ้าลอยกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สารประกอบตัวใหม่ขึ้นที่มีคุณสมบัติคล้ายผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในรูปสมการเคมีได้ดังนี้

ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ



ปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่าง  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  กับเถ้าลอย



### 2.7.1 คอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง

ได้มีการศึกษาคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงสำหรับใช้ในงานโครงสร้างครั้งแรกโดย The Canadian Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET) ในปลายทศวรรษ 1980 คอนกรีตชนิดนี้มีส่วนผสมเถ้าลอยมากกว่าซีเมนต์โดยน้ำหนักและปกติจะผสมที่อัตราส่วน W/B



ประมาณ 0.3 กำลังของคอนกรีตในระยะต้นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้และมีการพัฒนากำลังและโมดูลัสความยืดหยุ่นในระยะหลังมากขึ้นมีการหดตัวแห้ง (drying shrinkage) และการล้า (creep) ต่ำและมีความทนทานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ปกติเชื่อกันว่าในการผสมเถ้าลอยมากกว่า 50% โดยน้ำหนักเถ้าลอยจะมีส่วนสำคัญในการเชื่อมประสานเถ้าลอยเป็นที่รู้จักในฐานะวัสดุปอซโซลานมานานโดยตัวเถ้าลอยเองแล้วมีคุณสมบัติน้อยหรือไม่มีคุณสมบัติทางการเชื่อมประสาน (ASTM 618-94a, 1995) และไม่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้โดยตรงซึ่งโดยทั่วไปแล้วการใช้เถ้าลอยในคอนกรีตในงานโครงสร้างมักนิยมใช้แทนที่ซีเมนต์ในช่วง 15% ถึง 25% แต่เมื่อมีการใช้เถ้าลอยปริมาณที่สูงจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในการพัฒนากำลังและปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยทั่วไปปริมาณเถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตสำหรับใช้ในงานโครงสร้างจะจำกัดประมาณ 20 ถึง 25% ของวัสดุประสาน (Zhang, 1995) มาตรฐานในหลายประเทศยังคงจำกัดปริมาณมากที่สุดของเถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตสำหรับงานโครงสร้างประมาณ 20 ถึง 25% ซึ่งในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงปฏิกิริยาปอซโซลานอาจจะยังคงเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์เนื่องจากปริมาณเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนสูงเมื่อเทียบกับซีเมนต์ซึ่งเถ้าลอยบางส่วนอาจยังคงอยู่ในสภาพเดิมโดยไม่ทำปฏิกิริยาถึงแม้เป็นระยะหลังการบ่มเป็นเวลานาน

คอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณสูงเป็นวัสดุที่มีความชื้นน้ำที่ต่ำมาก (EPRI report TR-103151 1993) นอกจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นจากเถ้าลอยในคอนกรีตแล้วยังมีอีกหลายปัจจัยที่ทำให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณสูงมีความที่บ้น้ำเถ้าลอยซึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นอัยรูปของซิลิกาและอลูมินาทำให้อุณหภูมิของเถ้าลอยโดยทั่วไปจะที่บ้น้ำมากกว่าผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration product) โดยรอบถึงแม้ว่าความหนาแน่นและขนาดของอนุภาคเถ้าลอยจะลดลงเมื่อระยะเวลาบ่มมากขึ้นแต่ความหนาแน่นของอนุภาคเถ้าลอยส่วนที่เหลือยังคงสูงกว่า matrix ของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนอกจากนี้อนุภาคของเถ้าลอยขนาดเล็กจำนวนมากสามารถแทรกช่องว่างขนาดเล็กในเพสต์และบริเวณรอยต่อ interfacial zone ระหว่างมวลรวมหยาบและเพสต์ทำให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณสูงมีความชื้นน้ำต่ำ

### 2.7.2 ผลกระทบของปริมาณเถ้าลอยการแทนที่ซีเมนต์ต่อกำลังของคอนกรีต

พบว่ากำลังอัดระยะแรกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยเล็กน้อยมีค่าลดลงตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเวลามากขึ้นกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะดีขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและเสนอปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมในช่วง 0 ถึง 40% ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นชดเชยปฏิกิริยาของซีเมนต์ที่ถูกเถ้าลอยแทนที่ได้

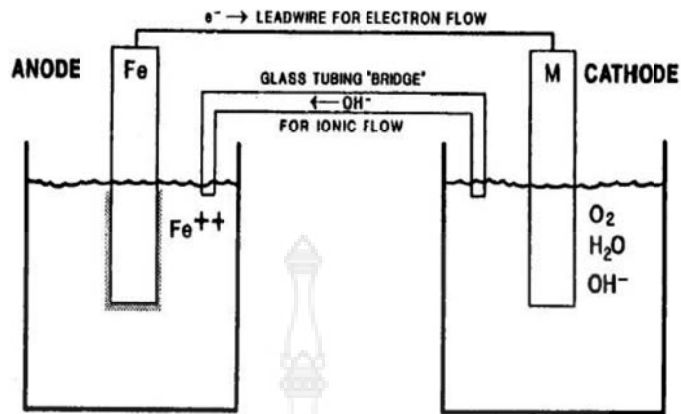
### 2.7.3 อิทธิพลของเถ้าลอยต่อกำลังอัด

การใช้คอนกรีตผสมเถ้าลอยในระยะเริ่มแรก จะใช้วิธีการเติมเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์เพื่อการประหยัดซีเมนต์ ทำให้ราคาคอนกรีตต่อหน่วยลดลง แต่การใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ โดยปริมาตรจะทำให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำกว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์โดยน้ำหนัก Gopalan และ Haque (1983) พบว่าการผสมเถ้าลอยต่อซีเมนต์โดยปริมาตรจะให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์โดยน้ำหนักเป็นที่

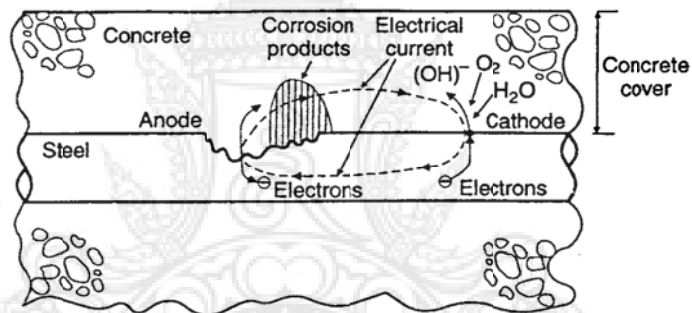
นิยมมากกว่าเพราะง่ายและสะดวกในทางปฏิบัติ แต่จะให้กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาในระยะเริ่มแรก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์และคุณภาพของเถ้าลอย Gopalan และ Haque (1983) พบว่าปริมาณเถ้าลอยสูงสุดที่ใช้แทนปูนซีเมนต์ควรอยู่ระหว่าง 25 – 30% โดยน้ำหนัก และถ้าเถ้าลอยมีคุณภาพดีอาจใช้แทนที่ซีเมนต์ได้ถึง 30 – 40% โดยน้ำหนักและเถ้าลอยที่ผ่านการอบด้วยไอน้ำจะสามารถใช้แทนที่ซีเมนต์ได้สูงถึง 45% โดยน้ำหนัก การที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีกำลังอัดในช่วงอายุต้น ๆ ต่ำ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นน้อยไม่เพียงพอที่จะชดเชยกำลังส่วนที่ลดลง เนื่องจากส่วนผสมมีปริมาณซีเมนต์ลดน้อยลง แต่เมื่ออายุมากขึ้นการเพิ่มกำลังอัดมีค่ามากขึ้นและอาจสูงกว่าคอนกรีต

## 2.8 การกัดกร่อนและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

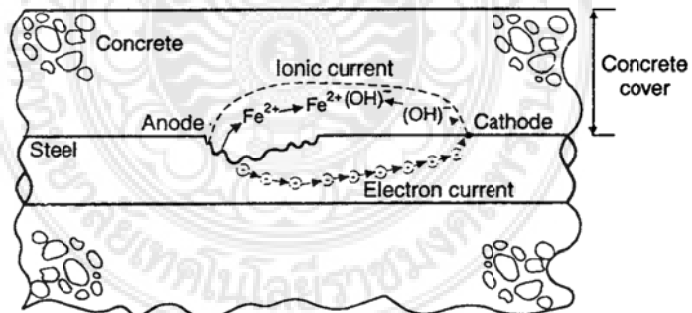
การกัดกร่อนของเหล็กเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีโดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ Anode Cathode และ Electrolyte โดยมีความสัมพันธ์กันอธิบายได้ ซึ่งเทียบได้กับการเกิด การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งเกิดจากการที่อะตอมของเหล็กเกิดการแตกตัวเป็น  $Fe^{+2}$  และเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนทำให้บริเวณนั้นเกิดเป็นขั้ว Anode ดังสมการที่ 5 อิเล็กตรอนนี้จะมีมากขึ้นบริเวณผิวของเหล็กเสริมทำให้เกิดศักย์ทางไฟฟ้าขึ้น ในบริเวณที่ไม่เกิดการแตกตัวของเหล็กจะมีศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่าจะทำหน้าที่เป็นขั้ว Cathode อิเล็กตรอนที่เกิดจาก Anode จะเคลื่อนที่ตามเหล็กเสริมมายัง Cathode ที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าและทำปฏิกิริยากับ Oxygen และน้ำที่อยู่บริเวณนี้ เกิด Hydroxyl อีออน ( $OH^-$ ) ขึ้น ดังสมการที่ 6 การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นทั้งกระแสภายในเหล็กและกระแสภายนอกเหล็ก กระแสภายในเหล็กเป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จาก Anode ไปสู่ Cathode และกระแสภายนอกเหล็กเป็นการเคลื่อนที่ของไอออน  $Fe^{+2}$  และ  $OH^-$  ผ่าน Pore Solution ของคอนกรีตรอบๆเหล็กเสริม (Bentur et al., 1997) โดยประจุลบคือ  $OH^-$  จะเคลื่อนที่จาก Cathode สู่ Anode และประจุบวก  $Fe^{+2}$  จะเคลื่อนที่จาก Anode สู่ Cathode การเคลื่อนที่ของไอออนผ่าน Pore Solution ของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่สำคัญของการเกิดการกัดกร่อน สารละลายในช่องว่างส่วนใหญ่เป็นสารละลายของ Alkali และ Calcium Hydroxide เปรียบเหมือนเป็นสารละลาย Electrolyte ทำให้เกิดการครบวงจรของ Galvanic Cell และเกิดการกัดกร่อนขึ้นได้ แต่ถ้าในช่องว่างนี้แห้งหรือโครงสร้างภายในของคอนกรีตที่บีบแน่นและช่องว่างภายในเกิดขึ้นไม่ต่อเนื่องการไหลของไอออนผ่านจะเกิดขึ้นได้ยากขึ้น ซึ่งทำให้การเกิดการกัดกร่อนช้าลงหรือกระทั่งหยุด



ภาพที่ 2-12 เซลล์ไฟฟ้าเคมีของการเกิดการกัดกร่อนในเหล็ก  
ที่หมา; วรเดช (2546)

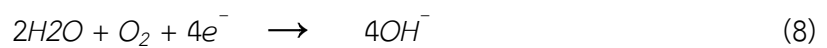


ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้ว Anode และ Cathode

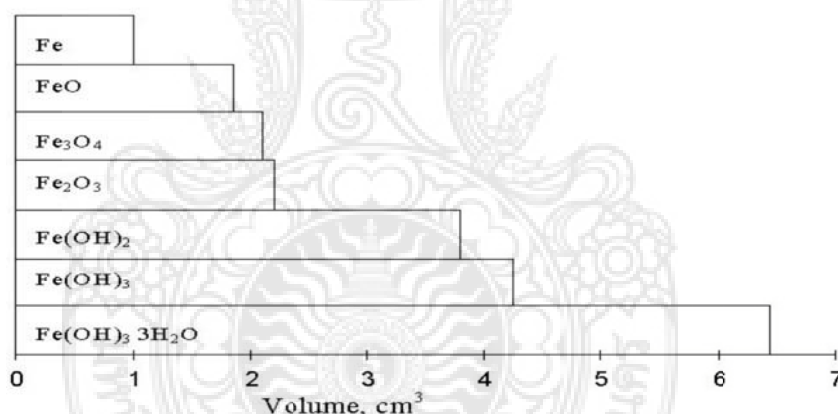
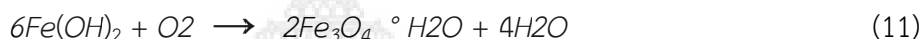
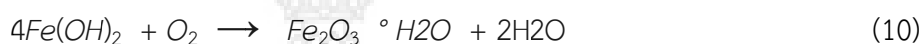


(ข) การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าภายในและภายนอกเหล็กเสริม

ภาพที่ 2-13 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนบนผิวเหล็กเสริม  
ที่หมา; วรเดช (2546)



จากการที่เกิด  $Fe^{+2}$  และ  $OH^-$  จาก Anode และ Cathode อีออนทั้งสองจะเคลื่อนที่เข้าหากันและทำปฏิกิริยาเกิดเป็น  $Fe(OH)_2$  ดังสมการที่ 7 ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปเป็น hydrate ferric oxide ( $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ ) หรือเรียกว่า red-brown rust และ black magnetite ( $Fe_3O_4$ ) ซึ่งเกิดจาก Green hydrate magnetite ( $Fe_3O_4 \cdot H_2O$ ) ดังสมการที่ 8, 9 และ 10 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของการกัดกร่อนคือสนิมในรูปแบบต่างๆ ซึ่งมีปริมาณมากกว่าเหล็กก่อนเกิดปฏิกิริยา 4 ถึง 6 เท่า (Nielsen, 1985) ซึ่งทำให้เกิดแรงดันภายในและคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ นอกจากนี้ในส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเหล็กเสริมบางจุดเกิดการสูญเสียเนื้อเหล็กและหน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงส่งผลต่อการรับแรงของโครงสร้างซึ่งถ้าไม่ได้รับการแก้ไขอาจเป็นอันตรายถึงขั้นการวิบัติของโครงสร้างได้

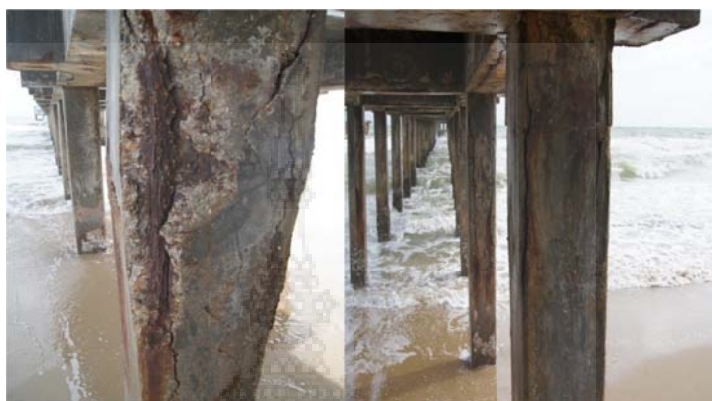


ภาพที่ 2-14 ปริมาตรสัมพัทธ์ของเหล็กและผลิตภัณฑ์ของการสนิม  
ที่มา; วรเดช (2546)

### 2.8.1 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

โดยทั่วไปสารประกอบคลอไรด์ไม่ส่งผลที่เป็นอันตรายกับเนื้อของคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริม ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้น้ำ ที่มีคลอไรด์ผสมในคอนกรีตกลับส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้นเพราะเป็นสารเร่งการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต แต่การใช้งานของคอนกรีตในโครงสร้างทั่วไป จำเป็นอย่างยิ่งต้องใส่เหล็กเสริมเข้าไปในคอนกรีตเพื่อให้รับแรงดึงเพราะจากคอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงดึงได้น้อยมาก และการที่คอนกรีตมีเหล็กเสริมนี้เองจึงส่งผลให้การทา ลายเนื่องจากคลอไรด์ต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความชัดเจนและรุนแรงมาก ทั้งนี้เนื่องจากการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนจากสารเคมีอื่นตรงที่คลอไรด์

สามารถทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมและคอนกรีตบริเวณรอบๆเหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหายเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริม ซึ่งดันคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าว ตลอดจนทำให้ความสามารถในการรับแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมและคอนกรีตต่ำลงและเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ ลายคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยลักษณะการทำลายของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมจริง แสดงดังรูป



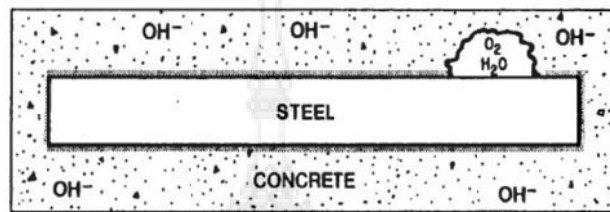
รูปที่ 2-15 ความเสียหายเนื่องจากคลอไรด์โดยเหล็กเป็นสนิมดันคอนกรีต

การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม และคอนกรีตบริเวณรอบๆเหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหาย เนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมและเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ลายของค่าอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก หลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งเกิดขึ้นนั่นคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่าง ทำให้ซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีความเป็นด่างสูง คือ มีค่า pH ประมาณ 12.5 ถึง 13.5 ความเป็นด่างของคอนกรีตจะช่วยป้องกันเหล็กเสริมภายในคอนกรีตไม่ให้เกิดสนิม โดยจะเกิดชั้นฟิล์มบางๆ ของ  $-\text{Fe}_2\text{O}_3$  เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ ซึ่งสามารถป้องกันน้ำ และก๊าซออกซิเจนไม่ให้มาทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมจึงไม่เกิดสนิมขึ้น อย่างไรก็ตามไอออนของคลอไรด์ก็สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ และเมื่อมีน้ำ และออกซิเจนมาสัมผัสกับเหล็กเสริมบริเวณที่ไม่มีฟิล์มออกไซด์ปกป้องอยู่ เหล็กก็จะเกิดสนิม

#### 2.8.2 ผลกระทบของคลอไรด์ในคอนกรีต

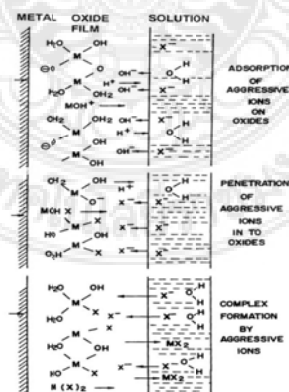
คลอไรด์ในคอนกรีตมีแหล่งที่มาได้ทั้งจากภายในและภายนอก ซึ่งคลอไรด์จากแหล่งภายในอาจได้มาในระหว่างการผสมโดยอาจมาจากวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีตเช่น หิน ทราาย น้ำที่ใช้ผสม มีการปนเปื้อนคลอไรด์ หรือมาจากน้ำยาผสมคอนกรีตเช่น สารเร่งการก่อตัว  $\text{CaCl}_2$  เป็นต้น คลอไรด์จากแหล่งภายนอกเป็นคลอไรด์ที่เข้าสู่คอนกรีตเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วซึ่งอาจมาจากน้ำทะเล พื้นดิน หรือเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็ง (De-icing salt) ในประเทศที่มีอากาศหนาวเย็น คลอไรด์ที่มาจากแหล่งภายนอกเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นในเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

โดยธรรมชาติเหล็กเสริมในคอนกรีตจะมี Passivation จาก  $Fe_2O_3$  ปกป้องเหล็กเสริมจากการเกิดสนิม ดังภาพที่ 4 Passive layer ที่เคลือบที่ผิวของเหล็กเสริมทำให้อัตราการแพร่ของ Oxygen และน้ำ มาสู่ผิวเหล็กเสริมลดลงทำให้อัตราการเกิดการกัดกร่อนลดลง โดย Passive layer นี้มีเสถียรภาพอยู่ได้ในสภาวะความเป็นด่างสูง ซึ่งเป็นธรรมชาติของคอนกรีตที่มี  $Ca(OH)_2$   $KOH$  และ  $NaOH$  ทำให้คอนกรีตมี pH อยู่ในช่วง 12 ถึง 13 คอนกรีตจึงเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติปกป้องเหล็กเสริมจากการเกิดสนิมตามธรรมชาติ



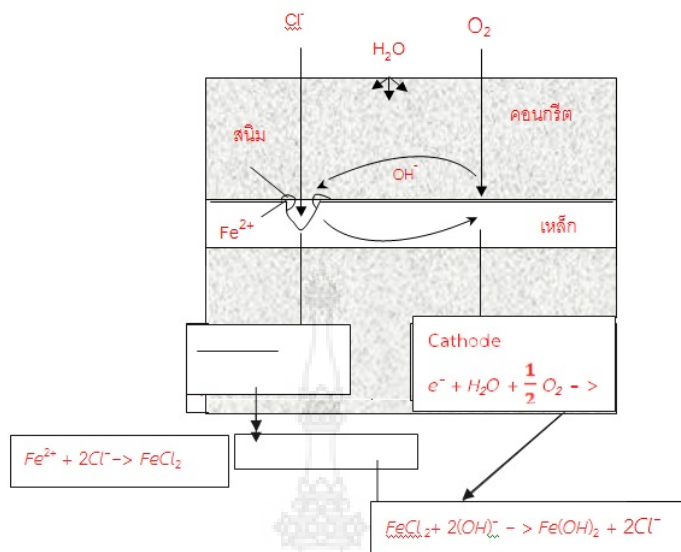
ภาพที่ 2-16 เหล็กถูกปกป้องจาก Passive layer จากการเกิดสนิม  
ที่มา; S.Mindess, J.F.Young and D.Darwin.,(2003)

จากการที่มีคลอไรด์ใน Pore Solution ของคอนกรีตและแพร่ไปถึงผิวเหล็กเสริมจนมีความเข้มข้นของไอออนถึงระดับ threshold (ระดับที่มีคลอไรด์ต่ำที่สุดที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อน) จะทำให้เกิด Depassivation ของ Passive layer โดยคลอไรด์จะ  $Y \cdot Fe_2O_3$  ซ้ำรวมตัวกับ  $Y \cdot Fe_2O_3$  โดยเข้าแทนที่ Oxygen บางตัวและเกิดเป็น complex ละลายออกสู่ภายนอก ดังภาพที่ 5 ทำให้ Passive layer เกิดความเสียหาย เหล็กเสริมเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ง่าย ซึ่งเป็นกัดกร่อนแบบ pitting corrosion นอกจากนี้คลอไรด์ยังทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเข้าทำปฏิกิริยากับ  $Fe^{+2}$  เกิดเป็น  $FeCl_2$  และ  $FeCl_2$  ทำปฏิกิริยาต่อกับ  $OH^-$  เกิดเป็น  $Fe(OH)_2$  และเหลือ คลอไรด์กลับมาทำปฏิกิริยาใหม่ได้อีก ดังภาพที่ 6]



ภาพที่ 2-17 การทำลายชั้น Passive layer โดยสารเคมีรุนแรง  
ที่มา; S.Mindess, J.F.Young and D.Darwin.,(2003)

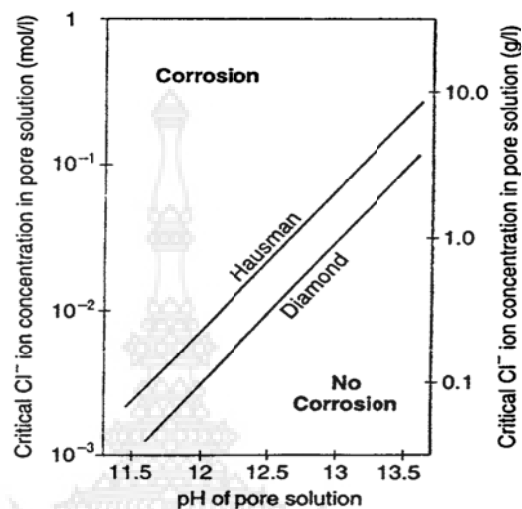




ภาพที่ 2-18 การเข้าทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมของคลอไรด์  
 ที่มา; S.Mindess, J.F.Young and D.Darwin.,(2003)

อิทธิพลของคลอไรด์ไอออนในการทำลาย Passive layer ของเหล็กเสริมขึ้นอยู่กับกระบวนการที่เกิดขึ้นตรงกันข้ามกันระหว่างการเพิ่มเสถียรภาพและการซ่อมแซม Passive layer โดย  $OH^-$  และการทำลาย Passive layer โดยคลอไรด์ไอออน ซึ่งก่อนการเกิด Depassivation ความเข้มข้นของคลอไรด์จะต้องถึงระดับ threshold ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับ pH ของคอนกรีต และ pH ของคอนกรีตสัมพันธ์กับความเข้มข้นของไอออน  $OH^-$  Hausman (1967) เสนอความเห็นบนพื้นฐานจากการวัดปริมาณจากสารละลาย  $Ca(OH)_2$  ว่าความเข้มข้น threshold ของคลอไรด์ไอออนมีค่าประมาณ 0.6 เท่าของความเข้มข้นของไอออน  $OH^-$  แต่ pH ของสารละลาย calcium hydroxide ที่ Hausman ใช้้นั้นไม่เกิน 12.5 ซึ่งใน pore solution ของคอนกรีตอาจพบค่า pH ที่สูงกว่านี้ เนื่องจากการมี potassium และ sodium hydroxide ละลายอยู่ Gouda (1970) ได้ทดสอบในสารละลาย sodium hydroxide ในบริเวณที่มี pH สูง และได้เสนอความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ threshold chloride กับ pH ในรูป logarithm โดย Diamond (1986) ได้นำข้อมูลของ Gouda มาคำนวณใหม่ในรูปของ  $Cl^- / OH^-$  และสามารถพบได้ในระดับ pH ที่สูงกว่า 12.5 โดยมีอัตราส่วน  $Cl^- / OH^-$  ประมาณ 0.3 แทน 0.6 ซึ่งอาจเหมาะสมกว่าระดับที่ Hausman เสนอไว้ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนคลอไรด์วิกฤตและ pH ในเงื่อนไข 0.6 และ 0.3 แสดงดังภาพที่ 7 อย่างไรก็ตามการพิจารณาในแง่ปริมาณของ pH และไอออน  $Cl^-$  threshold ยังคงมีความไม่แน่นอน เนื่องจากข้อมูลทั้งของ Hausman และ Gouda ได้จากการทดลองในสารละลายแทนที่จะเป็นในคอนกรีต ซึ่งผลกระทบอื่นๆในคอนกรีตอาจมีอิทธิพลต่อค่า threshold ในทางปฏิบัติข้อกำหนดหรือข้อเสนอแนะส่วนใหญ่ไม่ได้กำหนดในรูปของอัตราส่วน  $Cl^- / OH^-$  หรือความเข้มข้นของ  $Cl^-$  และ  $OH^-$  ที่พบจริงใน pore solution ของคอนกรีตแต่จะอ้างถึงในรูปของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total content of Chloride) ในคอนกรีต โดยจะระบุในรูปของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์ที่ใช้ ข้อกำหนดหรือข้อเสนอแนะส่วนใหญ่ระบุปริมาณคลอไรด์ที่มีควรมีน้อยกว่าประมาณ 0.2% ของปริมาณซีเมนต์ของคอนกรีตเช่นใน

The Building Research Establishment guidelines แนะนำว่าคอนกรีตที่มีคุณภาพดีควรมีปริมาณไอออน ของคลอไรด์น้อยกว่า 0.2% ของซีเมนต์ที่ใช้และมีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมสูงเมื่อมีปริมาณคลอไรด์ไอออนมากกว่า 1%



ภาพที่ 2-19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น threshold chloride ion และ ระดับ pH ที่มา; S.Mindess, J.F.Young and D.Darwin.,(2003)

### 2.8.3 การแพร่ในคอนกรีต

ความทนทานของคอนกรีตขึ้นอยู่กับความยากง่ายที่ของเหลวหรือก๊าซสามารถผ่านเข้าสู่คอนกรีตผ่านทาง pore system ภายในเพสต์และ interface zone บริเวณระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวม (Neville, 1995) ซึ่ง interface zone เป็นบริเวณที่มีการเกิด microcrack จำนวนมากด้วยเหตุนี้ interface zone จึงเป็นช่องทางสำคัญของเหลวหรือก๊าซจากภายนอกผ่านเข้าไปในคอนกรีต (Young, 1988) อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าใน interface zone มีความพรุน (porosity) ที่สูงกว่า แต่ความสามารถในการซึมได้ของคอนกรีตยังคงขึ้นกับคุณสมบัติของส่วนที่เป็นเพสต์ (Larbi, 1993) ซึ่งจะเห็นได้จากความซึมได้ของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วไม่ได้ต่ำกว่าของคอนกรีตที่ผสมขึ้นจากซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมเดียวกัน นอกจากนี้การที่คอนกรีตมีมวลรวมจะทำให้เส้นทางการซึมผ่านคดเคี้ยวเพิ่มระยะทางในการซึมผ่านมากขึ้น ซึ่งในมวลรวมอาจจะมีช่องว่างเช่นเดียวกัน แต่ช่องว่างในมวลรวมตามปกติจะไม่ต่อเนื่องกันและมวลรวมยังถูกหุ้มเคลือบด้วยซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นช่องว่างในมวลรวมจึงไม่ถือว่าเป็นช่องทางซึมผ่านของของเหลวหรือก๊าซ

เมื่อพิจารณาถึงความซึมได้ของคอนกรีต กลไกของความซึมได้ของคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลไก ที่แตกต่างกัน ความสามารถในการซึมได้ (permeability) คือการไหล (flow) ภายใต้ความแตกต่างของความดัน, การแพร่ (diffusion) คือการเคลื่อนที่ของของไหล (fluid) ภายใต้ความเข้มข้นที่แตกต่างกันและ sorption คือการเคลื่อนที่ของของไหลเนื่องจากแรงดึง capillary ที่เกิดขึ้น เฉพาะกับคอนกรีตที่กึ่งเปียกกึ่งแห้ง

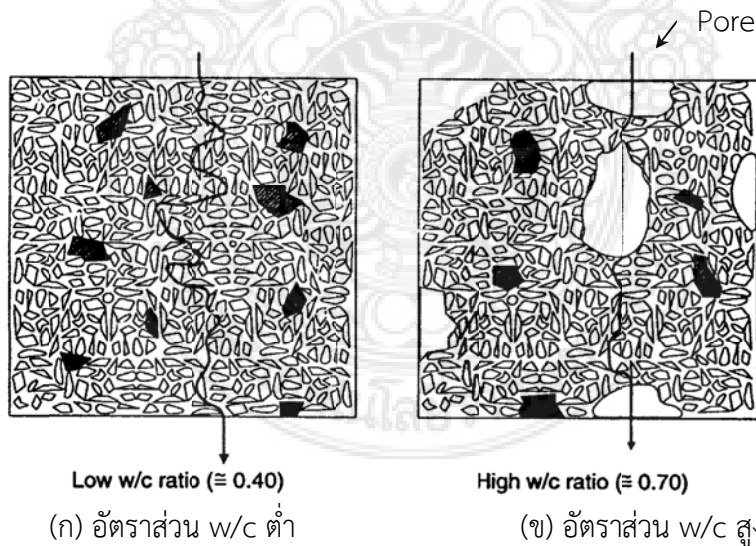


การแพร่ในคอนกรีตจะเกิดขึ้นเมื่อออสโมซิสในสารละลายภายนอกมีความเข้มข้นมากกว่าความเข้มข้นในช่องว่างของคอนกรีต ซึ่งสามารถอธิบายโดย Fick's Law

$$\frac{dc}{dt} = D \left( \frac{d^2c}{dx^2} \right) \quad (13)$$

เมื่อ  $c$  คือความเข้มข้นของสารที่แพร่ที่ระยะ  $x$  จากผิว ณ เวลา  $t$  และ  $D$  คือค่าคงที่ของการแพร่ในหน่วย  $m/s^2$  ค่าคงที่ของการแพร่จะคงที่ในสภาพใดสภาพหนึ่งเท่านั้น โดยจะแปรเปลี่ยนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิคุณสมบัติของสารที่แพร่และคุณสมบัติของวัสดุที่เกิดการแพร่ ในคอนกรีตการแพร่ส่วนใหญ่เกิดขึ้นผ่านช่องว่างในส่วนที่เป็นเพสต์ของคอนกรีต และอาจจะเกิดขึ้นบางส่วนบริเวณ interfacial zone ในบริเวณระหว่างเพสต์และมวลรวม ดังนั้นในคอนกรีตที่บีบแน่นเนื่องจากมีอัตราส่วน W/C ที่ต่ำช่องว่างส่วนใหญ่จะไม่ต่อเนื่องและเส้นทางการแพร่จะคดเคี้ยวเพิ่มระยะทางการแพร่ (Bentur et al., 1997) ดังนั้นค่าคงที่ของการแพร่ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วน W/C ที่ต่ำจะมีค่าน้อยและในคอนกรีตที่มีอัตราส่วน W/C ที่สูงเพสต์จะมีความพรุนมากกว่าและมีช่องว่างที่ใหญ่และมีความต่อเนื่องของช่องว่าง ดังนั้นค่าคงที่ของการแพร่จะมีค่าที่สูงกว่า นอกจากอัตราส่วน W/C จะส่งผลต่อการแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตแล้ว มีรายงานจำนวนมากระบุว่าถ้าปล่อยให้ค่าคงที่ของการแพร่ของไอออนคลอไรด์ลดลงและเป็นการเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดการกัดกร่อนในเหล็กเสริมในคอนกรีต

Thomas (1996) ศึกษาคอนกรีตผสมเถ้าลอยในสภาพแวดล้อมที่ติดกับทะเลในช่วง 1 ถึง 4 ปี โดยตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กประสบกับสภาพน้ำขึ้นน้ำลง ค่าการสูญเสียมวลของเหล็กเสริมนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณเหล็กเสริมและพบว่าระดับของคลอไรด์ที่สูงที่สุด



(ก) อัตราส่วน w/c ต่ำ

(ข) อัตราส่วน w/c สูง

ภาพที่ 2-20 เส้นทางการแพร่ในคอนกรีต

ที่มา; S.Mindess, J.F.Young and D.Darwin.,(2003)

โดยที่การสูญเสียมวลของเหล็กเสริมจากการกัดกร่อนไม่เห็นชัดเจนแปรเปลี่ยนไปตามปริมาณของเกลือลอย และสรุปว่าเกลือลอยคอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีในการป้องกันเหล็กเสริมในสภาวะแวดล้อมที่ติดทะเล

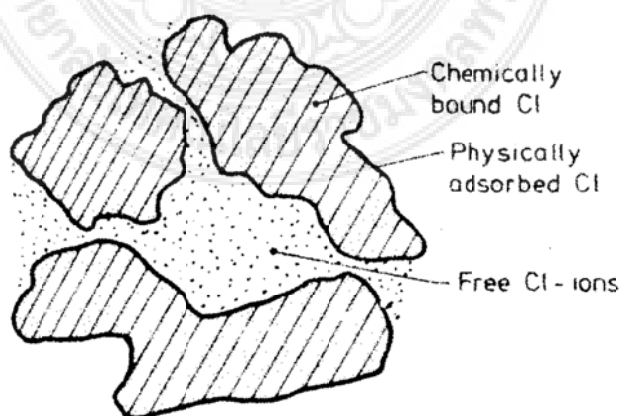
Cabrera(1996) ศึกษาผลของอัตราการกัดกร่อนต่อการแตกของตัวอย่างและการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมและอิทธิพลของเกลือลอยต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริม พบว่าเกลือลอยคอนกรีตมีคุณสมบัติต้านทานต่อการเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนดีกว่าคอนกรีตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ปกติ

Ampuda et al.(1999) ศึกษาผลของเกลือลอยต่อการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์โดยใช้วิธี accelerated chlorides ion diffusion test และผลที่ได้จากการทดสอบจะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ของการแพร่ของคลอไรด์โดยใช้สมการ Nemst – Plank พบว่าค่าคงที่ของการแพร่ของอิออนคลอไรด์ในซีเมนต์ผสมเกลือลอยอยู่ในช่วง  $10^{-7}$  และ  $10^{-9}$   $\text{cm}^2/\text{s}$  และซีเมนต์ที่ผสมเกลือลอยทำให้ค่าคงที่ของการแพร่ลดลงอย่างมากโดยเฉพาะหลังการบ่ม และอัตราส่วนแทนที่เกลือลอย 40% ให้ผลดีที่สุดในแง่การแพร่ในซีเมนต์ผสมเกลือลอย โดยอัตราส่วน W/B มีผลต่อค่าคงที่ของการแพร่อิออนคลอไรด์เฉพาะช่วงต้นของอายุการบ่มแต่มีผลน้อยลงในช่วงหลังของการบ่ม

#### 2.8.4 คุณสมบัติการจับยึดคลอไรด์ของเกลือลอยในคอนกรีต

การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณคลอไรด์อิออนมากพอที่ผิวของเหล็กเสริมซึ่งปริมาณคลอไรด์ดังกล่าวไม่ได้หมายถึงคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride Content) ที่ทำให้เกิดสนิมขึ้นในเหล็กเสริม เนื่องจากว่าคลอไรด์บางส่วนถูกจับยึดทางเคมี (Chemical Binding) โดยเข้าทำปฏิกิริยารวมอยู่ในผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ และบางส่วนถูกจับยึดอยู่บนผิวของ gel pore ในลักษณะกายภาพ (Physical Binding) และคลอไรด์ที่เหลือคือคลอไรด์อิสระ Free Chloride ที่อยู่ใน pore Solution ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนในเหล็กเสริม ภาพที่ 2-20 แสดงรูปแบบของคลอไรด์ในคอนกรีต

ในกรณีของคลอไรด์ในคอนกรีตจากแหล่งภายใน ซึ่งอาจได้มาในระหว่างการผสมโดยอาจมาจากวัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต เช่น หิน ททราย น้ำที่ใช้ผสมที่มีการปนเปื้อนคลอไรด์



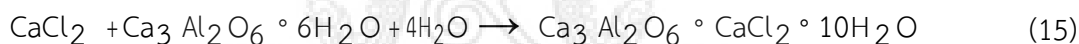
ภาพที่ 2-21 รูปแบบของคลอไรด์ที่แตกต่างกันของคอนกรีต  
ที่มา; S.Mindess, J.F.Young and D.Darwin.,(2003)

มาจากน้ำยาผสมคอนกรีต เช่น สารเร่งการก่อตัว  $\text{CaCl}_2$  คลอไรด์ไอออนจะทำปฏิกิริยากับ C3A เกิดเป็น calcium chloroaluminate ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) หรือ Friedel's salt ดังภาพจำลองโครงสร้างทางเคมี แสดงในภาพที่ 10 (Kalinichev et al., 2000) หรือทำปฏิกิริยากับ C4AF ทำให้เกิด calcium chloroferrite ( $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) โดย  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  หรือ ในรูปย่อคือ  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{H}_6$  เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันขั้นสุดท้ายของ C3A และ C4AF เข้าทำปฏิกิริยาเกิดเป็น Friedel's salt ดังสมการที่ 12 และ 13 อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วดังนั้นคลอไรด์จากแหล่งภายนอกซึ่งเข้าสู่คอนกรีตเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว การจับยึดทางเคมีเนื่องจากเกิดสาร chloroaluminate เกิดขึ้นน้อยมาก (Neville, 1995) แต่คลอไรด์ยังอาจถูกจับยึดบนผิว C-S-H ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C3S และ C2S โดยอาจแบ่งลักษณะกลไกการจับยึดคลอไรด์ของ C-S-H ออกเป็น 3 ประเภท คือ การจับยึดบน C-S-H (Chemisorbed layer), การจับยึดอยู่ระหว่างชั้น C-S-H (Interlayer) และ การจับยึดใน C-S-H lattice

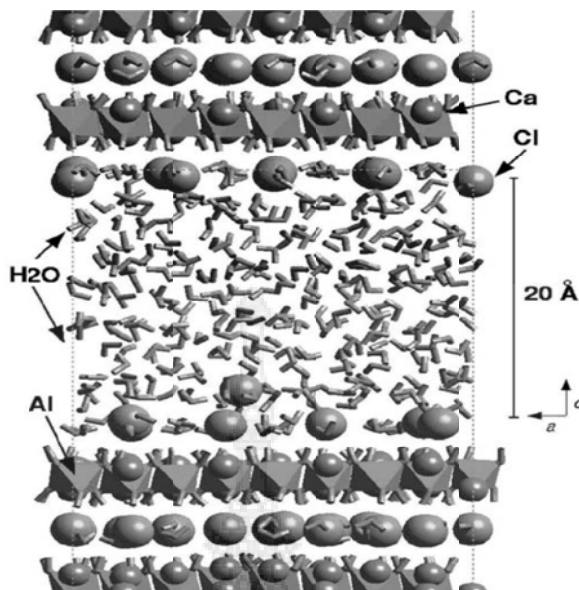
ในกรณีแหล่งที่มาของคลอไรด์คือ NaCl ปฏิกิริยาเขียนได้ดังนี้



ในกรณีแหล่งที่มาของคลอไรด์คือ  $\text{CaCl}_2$  ปฏิกิริยาเขียนได้ดังนี้



ความสามารถในการจับยึดคลอไรด์ในคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อมีการผสมเถ้าลอยในคอนกรีต โดยศึกษาการปรับปรุงความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีต โดยการใช้การผสมเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์จนถึง 67% และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ พบว่าความสามารถในการจับยึดคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงการแทนที่เถ้าลอย 50% แต่เมื่อการแทนที่ซีเมนต์ของเถ้าลอยมากกว่านี้ความสามารถในการจับยึดคลอไรด์จะลดลง Jensen and Pratt (1989) ศึกษาการจับยึดคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย (Class F) 30% โดยใช้ น้ำทะเลจำลอง และทดสอบการให้คลอไรด์ทั้งแบบระหว่างผสม และ แบบให้แพร่ผ่านเพสต์ ในการให้คลอไรด์ระหว่างผสมพบว่าชั้นแรกซัลเฟตจะทำปฏิกิริยาเกิดเป็น ettringite และเกิด Friedel's salt ตามมา ในการให้คลอไรด์แพร่ผ่านเพสต์พบว่าคลอไรด์และซัลเฟตในน้ำทะเลจะแพร่ผ่านเข้าสู่คอนกรีต โดยคลอไรด์แพร่ได้เร็วกว่าซัลเฟต เข้าทำปฏิกิริยาเกิดเป็น Friedel's salt และพบว่าในตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยมี Friedel's salt มากขึ้น



ภาพที่ 2-22 ภาพจำลองโครงสร้างทางเคมีของ Friedel's salt  
ที่มา; S.Mindess, J.F.Young and D.Darwin.,(2003)

Arya et al. (1990) ศึกษาการจับยึดคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย 0, 15 และ 35% และผสม ground blast furnace slag (GBFS) 70% และผสมซิลิกาฟุ่ม 15% โดยใช้ W/B เท่ากับ 0.5 และใส่ NaCl  $\text{Cl}^-$  1% ในระหว่างการผสมซีเมนต์เพสต์ หลังจากนั้นบ่มตัวอย่าง 28 วัน ก่อนนำมาทดสอบ พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณทั้งเถ้าลอยและ GBFS จะสัมพันธ์กับความสามารถในการจับยึดคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ่มจะลดความสามารถในการจับยึดคลอไรด์ นอกจากนี้ยังทำการทดสอบซีเมนต์เพสต์เฉพาะที่ระดับแทนที่ซีเมนต์ของเถ้าลอย 30% โดยไม่ใส่คลอไรด์ในระหว่างการผสม แต่หลังการบ่มตัวอย่าง 2 วัน แซ่ตัวอย่างในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 20 กรัม  $\text{Cl}^-/\text{L}$  เป็นเวลา 28 วัน ซึ่งจากทั้งสองวิธีให้ค่าแตกต่างของการจับยึดคลอไรด์เล็กน้อย แต่มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน

Arya and Xu (1995) ศึกษาผลกระทบของชนิดของแร่ธาตุผสมเพิ่มที่ใช้แทนที่ซีเมนต์โดยใช้ GBFS 65%, เถ้าลอย (FA) 35% และซิลิกาฟุ่ม (SF) 10% โดยใช้ W/B เท่ากับ 0.5 และผสม NaCl ในระหว่างการผสมเพสต์ ใช้ปริมาณ  $\text{Cl}^-$  เท่ากับ 1% ของวัสดุแห้ง (dry material) และทำการวัดปริมาณการจับยึดคลอไรด์ พบว่าความสามารถในการจับยึดคลอไรด์เรียงตามลำดับดังนี้ 10% SF < OPC < 35% FA < 65% GBFS

Haque and Kayyali (1995) ศึกษาการจับยึดคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย 0 และ 15% โดยวิธีผสมเพิ่ม (addition) โดยผสม NaCl ปริมาณ 0.2 ถึง 1.0  $\text{Cl}^-$  ของน้ำหนักซีเมนต์ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต และใช้ W/B เท่ากับ 0.37 ในส่วนผสมที่ไม่ใส่เถ้าลอยและ 0.32 ในส่วนผสมที่ผสมเถ้าลอย พบว่าการผสมเพิ่มเถ้าลอยในคอนกรีตเป็นการเพิ่มความสามารถในการจับยึดคลอไรด์

### บทที่ 3

#### วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

##### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

3.1.1 ปูนซีเมนต์ (Cement) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.15

3.1.2 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ที่มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 มีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 2.51, ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.30, ค่าร้อยละความชื้นผิวเท่ากับ 4.00 และความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) เท่ากับ 2.65

3.1.3 มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ใช้หินปูน ขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 19 มิลลิเมตร และขนาดเล็กที่สุดไม่เกิน 10 มิลลิเมตร ที่มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 มีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 6.34 ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.00, ค่าร้อยละความชื้นผิวเท่ากับ 0.5 ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) เท่ากับ 2.70 ค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1600 kg/m<sup>3</sup>



3.1.4 น้ำ ใช้น้ำประปาสะอาดผสมคอนกรีต (Water) มีความขุ่นไม่เกิน 2000 ppm. ปราศจากกรด ต่าง น้ำมัน และอินทรีย์สารอื่น ๆ ในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีต

3.1.5 เส้นใยผสมคอนกรีต (Fiber) คือ

3.1.5.1 เส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ ชนิดเส้นใยโพลีพรอพิลีน ลักษณะเส้นหักตลอดเส้น ความยาวประมาณ 58 มิลลิเมตร ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.91

3.1.5.2 เส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย (Hooked End) ขนาด 35 มิลลิเมตร ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 7.8

ตารางที่ 3-1 แสดงคุณสมบัติของเส้นใยผสมคอนกรีตในตัวอย่างการทดลอง

Type Of Fibers	Material	Specific Gravity	Shape	Length (mm)	Section (mm)	Diameter (mm)	Aspect Ratio (l/d)	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )
Crimped 58	PP	0.91		58	Rect. 1.0x0.5	-	52	450
HE 35	Steel	7.8		35	Circle	0.55	64	1100

##### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1. เครื่องทดสอบกำลังของคอนกรีต

3.2.2. แบบหล่อคอนกรีตตัวอย่าง

3.2.2.1 ขนาด 10 x 10 x 35 เซนติเมตร

3.2.2.2 ขนาด 10 x 10 x 10 เซนติเมตร

- 3.2.2.3 ขนาด 10 x 20 เซนติเมตร
- 3.2.3. เครื่องผสมคอนกรีตขนาดผสม 140-150 ลิตร
- 3.2.4. เครื่องจี้คอนกรีต (Vibrator)
- 3.2.5. อุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว (Slump test)
- 3.2.6. ถังสำหรับแช่ตัวอย่าง ขนาด 120 x 150 เซนติเมตร
- 3.2.7. เครื่องชั่งน้ำหนัก สามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.01 กรัม
- 3.2.8. เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสตรง
- 3.2.9. สารเคมีสำหรับเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (รายละเอียดแสดงในส่วนถัดไป)
- 3.2.10. สารเคมีสำหรับการไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ (รายละเอียดแสดงในส่วนถัดไป)
- 3.2.11. อุปกรณ์สำหรับเตรียมสารละลาย
- 3.2.12. เครื่องหาปริมาณคลอไรด์ไอออนในสารละลาย (Metrohm 781 pH/Ion Meter)
- 3.2.13. อะคลีติก ซิลิโคน และแผ่นแอสตันเลสสตีล
- 3.2.14. เวอร์เนียคาลิปเปอร์
- 3.2.15. โต๊ะทดสอบการไหลแผ่ (Flow table)

### 3.3 สัดส่วนผสมคอนกรีตและสัญลักษณ์

สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัยได้ถูกออกแบบตามการแนะนำของ ACI 211.1-91 โดย ออกแบบให้มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.42 และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ : ททราย : หินเท่ากับ 1 : 2 : 4 โดยปริมาตร ซึ่งปริมาณวัสดุที่ใช้สำหรับอัตราส่วนผสมของคอนกรีต 1 ลบ.ม.สรุปได้ดังตารางที่ 3-2

#### สัญลักษณ์

OPC หมายถึง คอนกรีตธรรมดา

OPC/PP หมายถึง คอนกรีตธรรมดา ผสมเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ชนิดเส้นใยโพลีพรอพิลีน

OPC/ST หมายถึง หมายถึง คอนกรีตธรรมดา ผสมเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ชนิดเส้นใย

เหล็ก

FA/PP หมายถึง คอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานถ้ำลอย ผสมเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ชนิดเส้นใยโพลีพรอพิลีน

FA/ST หมายถึง หมายถึง คอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานถ้ำลอย ผสมเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ชนิดเส้นใยเหล็ก

MK/PP หมายถึง คอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานดินขาว ผสมเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ชนิดเส้นใยโพลีพรอพิลีน

MK/ST หมายถึง คอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานดินขาว ผสมเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ชนิดเส้นใยเหล็ก

ตัวเลขต่อท้าย หมายถึง ปริมาณวัสดุปอซโซลานเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของคอนกรีต

1 ลบ.ม.

### 3.4 วิธีการทดสอบ

วัสดุและส่วนผสมคอนกรีต

#### 3.4.1 วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

- ปูนซีเมนต์ (Cement) ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.15

- มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ที่มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 มีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 2.51, ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.30, ค่าร้อยละความชื้นผิวเท่ากับ 4.00 และความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) เท่ากับ 2.65

- มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ใช้หินปูน ขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 19 มิลลิเมตร และขนาดเล็กที่สุดไม่เกิน 10 มิลลิเมตร ที่มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 มีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 6.34 ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.00, ค่าร้อยละความชื้นผิวเท่ากับ 0.5 ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) เท่ากับ 2.70 ค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1600 kg/m<sup>3</sup>

- น้ำ ใช้น้ำประปาสะอาดผสมคอนกรีต มีความขุ่นไม่เกิน 2000 ppm. ปราศจากกรดต่าง น้ำมัน และอินทรีย์สารอื่น ๆ ในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีต

- เส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ ชนิดเส้นใยโพลีพรอพิลีน ลักษณะเส้นหยักตลอดเส้นความยาวประมาณ 58 มิลลิเมตร ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.91 (รายละเอียดดังตารางที่ 3-1)

- วัสดุปอซโซลาน (เถ้าลอย, ดินขาว)

#### 3.4.2 อัตราส่วนผสมที่ใช้ทดสอบ

สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบได้ถูกออกแบบตามการแนะนำของ ACI 211.1-1 โดยออกแบบให้มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.42 และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน เท่ากับ 1 : 2 : 4 โดยปริมาตร ซึ่งปริมาณวัสดุที่ใช้สำหรับอัตราส่วนผสมของคอนกรีต 1 ลบ.ม. สรุปได้ดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (w/c = 0.42) (ปริมาณน้ำหนัก กก. ต่อลูกบาศก์เมตร)

Designation	% Fiber	Cement	Fine Agg.	Coarse Agg	Water	Fly Ash	Meta kaolin	Fiber	
								Plastic Fiber	Steel Fibers
OPC	-	440	874	930	206	-	-	-	-
OPC/PP	0.25	440	874	930	206	-	-	2.25	-
OPC/ST	0.50	440	874	930	206	-	-	-	39.25
FA20/PP	0.25	352	874	930	206	88	-	2.25	-

Designation	% Fiber	Cement	Fine Agg.	Coarse Agg	Water	Fly Ash	Meta kaolin	Fiber	
								Plastic Fiber	Steel Fibers
FA20/ST	0.50	352	874	930	206	88	-	-	39.25
FA35/PP	0.25	286	874	930	206	154	-	2.25	-
FA35/ST	0.50	286	874	930	206	154	-	-	39.25
MA15/PP	0.25	374	874	930	206	-	66	2.25	-
MA15/ST	0.50	374	874	930	206	-	66	-	39.25
MA20/PP	0.25	352	874	930	206	-	88	2.25	-
MA20/ST	0.50	352	874	930	206	-	88	-	39.25

ตารางที่ 3-3 รายละเอียดแสดงจำนวนตัวอย่างและการทดสอบ

Mixproportion	Curing in Water (Day)	Number of specimen				Total
		Compressive Strength	Flexural Strength	Splitting Tensile Strength	Chloride Penetration	
OPC	28	3	3	3	1	10
OPC/PP	28	3	3	3	1	10
OPC/ST	28	3	3	3	1	10
FA20/PP	28	3	3	3	1	10
FA20/ST	28	3	3	3	1	10
FA35/PP	28	3	3	3	1	10
FA35/ST	28	3	3	3	1	10
MA15/PP	28	3	3	3	1	10
MA15/ST	28	3	3	3	1	10
MA20/PP	28	3	3	3	1	10
MA20/ST	28	3	3	3	1	10
Total						110



### 3.5 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

3.5.1 การทดสอบการไหลแผ่การทดสอบการไหลแผ่เป็นการหาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์หรือวัสดุประสานมีความสำคัญต่อความพรุนและขนาดในช่องว่างของคอนกรีต โดยที่ความพรุนและขนาดในช่องว่างของคอนกรีตอาจส่งผลต่อกำลังอัด และความสามารถในการแพร่กระจาย ซึ่งปัจจัยของความพรุนคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์(w/c) เมื่อคอนกรีตมีความพรุนน้อยหมายถึงคอนกรีตมีความแน่นดี ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นและลดการซึมผ่าน และในปัจจุบันมีการนำวัสดุพอลิโพรพิลีนมาใช้ในงานคอนกรีต วัสดุพอลิโพรพิลีนบางชนิดอาจส่งผลให้ต่อปริมาณความต้องการน้ำที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นอย่างยิ่งในการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับส่วนผสมของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 230 โดยมีขั้นตอนการทดสอบ

1) เตรียมส่วนผสมที่ออกแบบไว้ไว้ในตารางที่ เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมโดยการควบคุมการไหลแผ่ของมอร์ตาร์เท่ากับร้อยละ  $110 \pm 5$  ตามมาตรฐาน ASTM C 230

2) ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับวัสดุพอลิโพรพิลีน และผสมเส้นใยสังเคราะห์ที่ได้คำนวณไว้ผสมคเข้าด้วยกัน แล้วเติมน้ำผสมคลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เข้าด้วยกันใช้เวลาประมาณ 3-5 นาที

3) วางแบบทดสอบการไหลแผ่บนโต๊ะทดสอบพยายามให้อยู่กึ่งกลางแท่นทดสอบ เทซีเมนต์มอร์ตาร์ลงในแบบหนาประมาณครึ่งหนึ่งของแบบใช้แท่งเหล็กกระทุ้งซีเมนต์มอร์ตาร์ 20 ครั้ง

4) ใส่ซีเมนต์มอร์ตาร์เพิ่มอีกครั้งจนล้นแบบกระทุ้งเพิ่มอีก 20 ครั้ง และปาดหน้าซีเมนต์มอร์ตาร์ส่วนเกินออกให้เสมอขอบแบบ

5) จากนั้นยกแบบขึ้นในแนวตั้งอย่างรวดเร็วแล้วหมุนแท่น ตกกระทบจำนวน 25 ครั้ง ในเวลา 15 วินาที

6) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แผ่กระจายบนแท่นทดสอบจำนวน 4 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง จากนั้นคำนวณหาค่าการไหลแผ่ด้วยสมการ

$$\%Flow = \frac{D_2 - D_1}{D_1} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อกำหนดให้

$\%Flow$  = ร้อยละการไหลแผ่ (ค่าร้อยละการไหลแผ่ที่ยอมให้ใช้เท่ากับร้อยละ  $110 \pm 5$ )

$D_1$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบทดสอบ

$D_2$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของซีเมนต์มอร์ตาร์บนแท่นทดสอบ

#### 3.5.2 ตัวอย่างคอนกรีตขนาด $10 \times 10 \times 35$ เซนติเมตร

การทดสอบกำลังอัดใช้แบบตัวอย่างคานทดสอบขนาด  $10 \times 10 \times 35$  เซนติเมตร ในขั้นตอนการผสมส่วนผสมของคอนกรีตทดสอบจะเริ่มต้นโดยผสม หิน ทราย ปูนซีเมนต์และสารผสมเพิ่มในไม่ผสมให้เข้ากันก่อน คลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เข้าโดยใช้เวลาประมาณ 3-5 นาที จากนั้นทำการเทคอนกรีตดังกล่าวลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้ ภายหลังจากหล่อคอนกรีตทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออกซึ่งตัวอย่างทดสอบที่เตรียมได้ จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปบ่มในสภาวะ บ่มน้ำ 28 วัน

### 3.5.3 ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10 x 10 x 10 เซนติเมตร

การทดสอบกำลังอัดใช้แบบตัวอย่างทดสอบขนาด 10x10x10 เซนติเมตร ในขั้นตอนการผสมส่วนผสมของคอนกรีตทดสอบจะเริ่มต้นโดยผสม หิน ทราย ปูนซีเมนต์และสารผสมเพิ่มในไม่ผสมให้เข้ากันก่อน คลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เข้าโดยใช้เวลาประมาณ 3-5 นาที จากนั้นทำการเทคอนกรีตดังกล่าวลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้ ภายหลังจากหล่อคอนกรีตทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออกซึ่งตัวอย่างทดสอบที่เตรียมได้ จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปบ่มในสภาวะ บ่มน้ำ 28 วัน

### 3.5.4 ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10 x 20 เซนติเมตร

การทดสอบกำลังดึงใช้แบบตัวอย่างทดสอบขนาด 10 x 20 เซนติเมตร ในขั้นตอนการผสมส่วนผสมของคอนกรีตทดสอบจะเริ่มต้นโดยผสม หิน ทราย ปูนซีเมนต์และสารผสมเพิ่มในไม่ผสมให้เข้ากันก่อน คลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เข้าโดยใช้เวลาประมาณ 3-5 นาที จากนั้นทำการเทคอนกรีตดังกล่าวลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้ ภายหลังจากหล่อคอนกรีตทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออกซึ่งตัวอย่างทดสอบที่เตรียมได้ จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปบ่มในสภาวะ บ่มน้ำ 28 วัน

3.5.5 การเตรียมสารละลายทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้าโดยวิธี Chloride Migration Test โดยเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 4 วัน และทำการเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อนำมาเป็นสื่อในการนำไฟฟ้าในการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้าโดยวิธี Chloride Migration Test โดยทำการเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 2 ชนิด ได้แก่

- (1) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl-)
- (2) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

## 3.6 วิธีการทดสอบ

### 3.6.1 การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength )

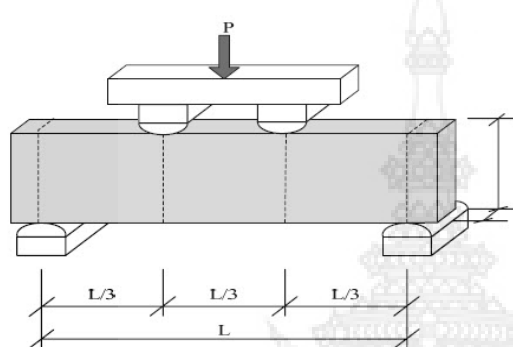
การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 10 x 10 x 10 เซนติเมตร ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C 39 เพื่อทำการทดสอบหาค่าความต้านทานแรงอัดของคอนกรีต



ภาพที่ 3-1 ภาพตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานของคอนกรีต ASTM C 39

### 3.6.2 การทดสอบกำลังดัด (Flexural Strength)

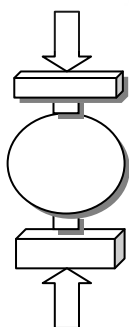
การทดสอบกำลังดัด (Flexural Strength) ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C 78 (Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam With Third-Point Loading) เครื่อง UTM ขนาด 1500 kN ค่า Load-Deflection ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์และคำนวณหาค่าหาค่าดัชนีความเหนียว (Toughness Indices) ตามมาตรฐาน ASTM C 1018-97 (Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete)



ภาพที่ 3-2 ภาพตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C78-94 (bending Test)

### 3.6.3 การทดสอบกำลังดึง (Splitting Tensile Strength)

การทดสอบกำลังดึงแยกของคอนกรีต (Splitting Tensile Strength) ดำเนินการตามมาตรฐานของ ASTM C 496 ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร วางนอนเพื่อรับแรงกดที่ส่งผ่านไม้อัดจะทำให้เกิดแรงดึงขึ้นตลอดหน้าตัด

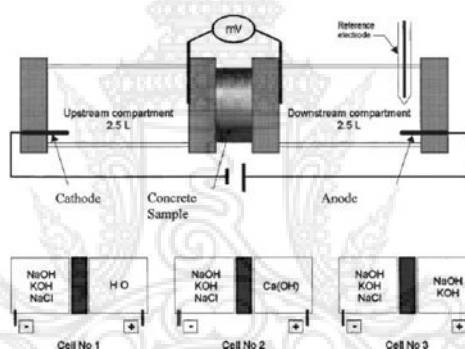


ภาพที่ 3-3 ภาพตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตตามมาตรฐานของ ASTM C 496

### 3.6.4 การทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตด้วยวิธี Chloride Migration Test

ทำการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยใช้ปฏิภาคส่วนผสมเดียวกันกับข้างต้นและทำการบ่มคอนกรีตเป็นเวลา 28 วันหลังจากนั้นทำการตัดคอนกรีตด้วยเครื่องตัดคอนกรีตเพื่อทำการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อออนด้วยไฟฟ้าโดยวิธี Chloride Migration Test โดยใช้สมการของ Nernst planck (Modified Fick's second law) จากมาตรฐาน JSCE -G571-2003 เพื่อยืนยันผลการทดลองการเคลื่อนที่ของคลอไรด์โดยนำคอนกรีตที่ทำการตัดมาเคลือบอีพ็อกซีด้านข้าง ทำการแช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจากนั้นทำการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด 12 โวลต์ดังแสดงในภาพที่ 1 และทำการวัดปริมาณคลอไรด์อออนที่อยู่ในสารละลายทุก 4 วันด้วยเครื่อง Chloride Analyzer

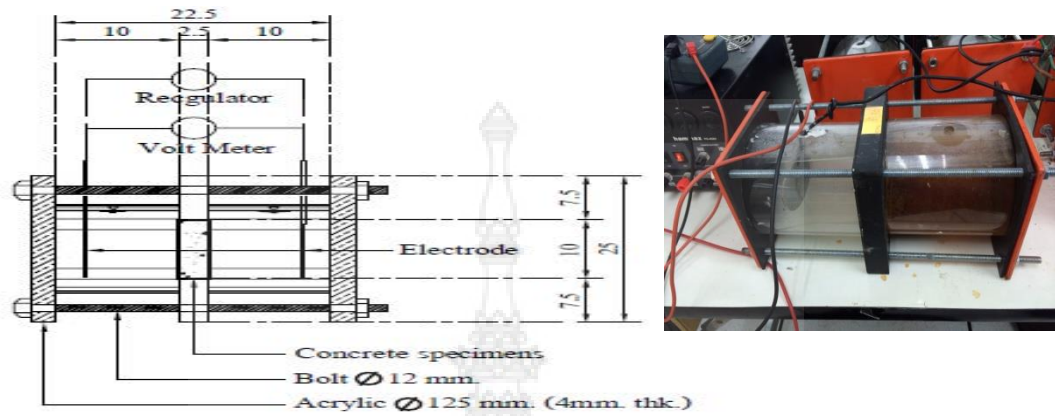
$$J_{Cl} = D_e \frac{z_{cl} FC_{cl} (\Delta E - \Delta E_c)}{RTl} \quad (2)$$



ภาพที่ 3-4 ตัวอย่างการเตรียมก่อนคอนกรีตเข้าเครื่องทดสอบ

โดยนำผลการทดสอบ Chloride Migration Test ในส่วนของอัตราการไหล (Flux,  $J_{Cl}$ ) ของคลอไรด์อออนและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Diffusion Coefficient,  $D_e$ ) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตทดลองชนิดต่างๆ

การทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตด้วยวิธี Chloride Migration Test ของคอนกรีตที่ใช้ปฏิภาคส่วนผสมเดียวกันโดยใช้สารละลายที่มีศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกขั้วลบ 3 ชนิดและใช้กระแสไฟฟ้าในการทดสอบขนาด 12 โวลต์ในทุกตัวอย่างโดยผลการทดลองพบว่าผลกระทบของสารละลายมีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตดังแสดงในภาพที่ 3-5 โดยในรายงานผลการทดลองได้รายงานผลว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นการจำลองสารละลายในช่องว่างของคอนกรีตสามารถดึงปริมาณคลอไรด์อออนมาสะสมอยู่ในสารละลายได้มากกว่าสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์และการใช้น้ำเป็นสารละลาย



ภาพที่ 3-5 ตัวอย่างการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อิออนด้วยไฟฟ้า Chloride Migration Test

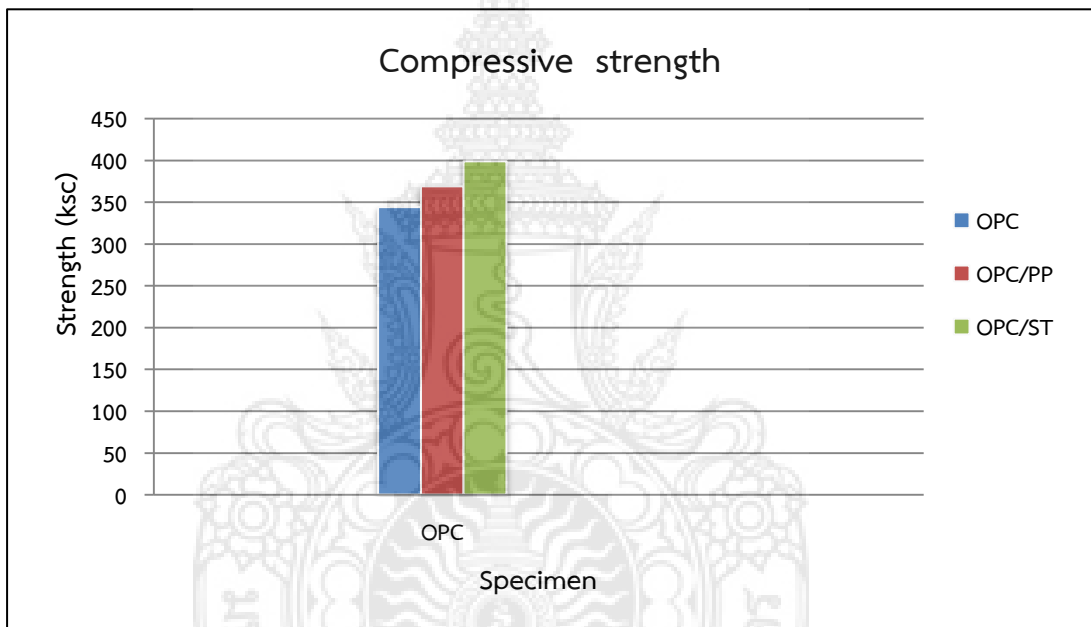


## บทที่ 4

### วิเคราะห์ผลการศึกษา

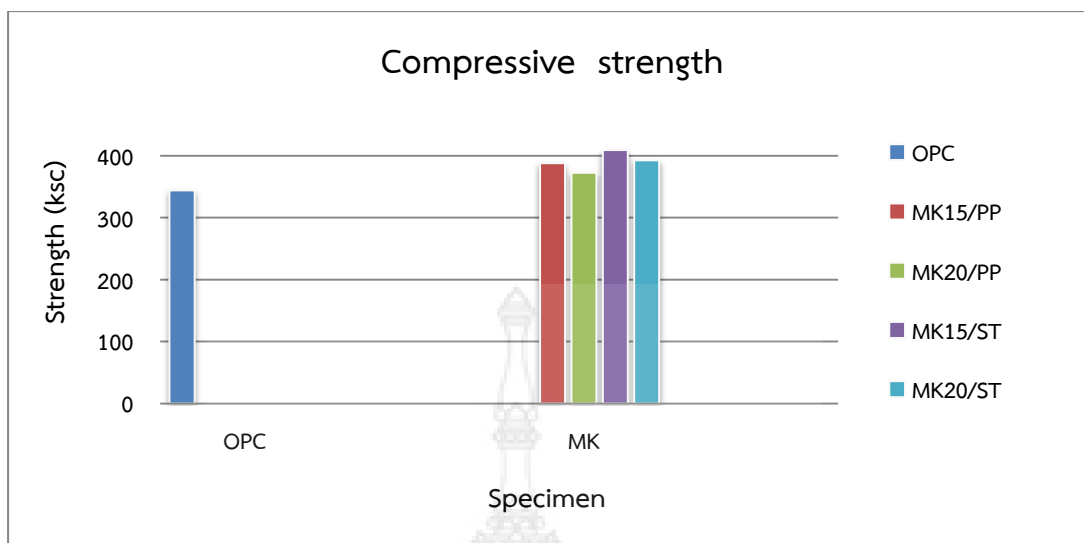
#### 4.1 พฤติกรรมการรับแรงอัด

การทดสอบกำลังอัดใช้แบบตัวอย่างทดสอบขนาด 10x10x10 เซนติเมตร ภายหลังจากหล่อคอนกรีตทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออกซึ่งตัวอย่างทดสอบที่เตรียมได้ จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปบ่มในสภาวะ บ่มน้ำ 28 วัน จึงทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 39 ค่า Load-Deflection ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์และคำนวณหาค่าหาค่ากำลังอัด



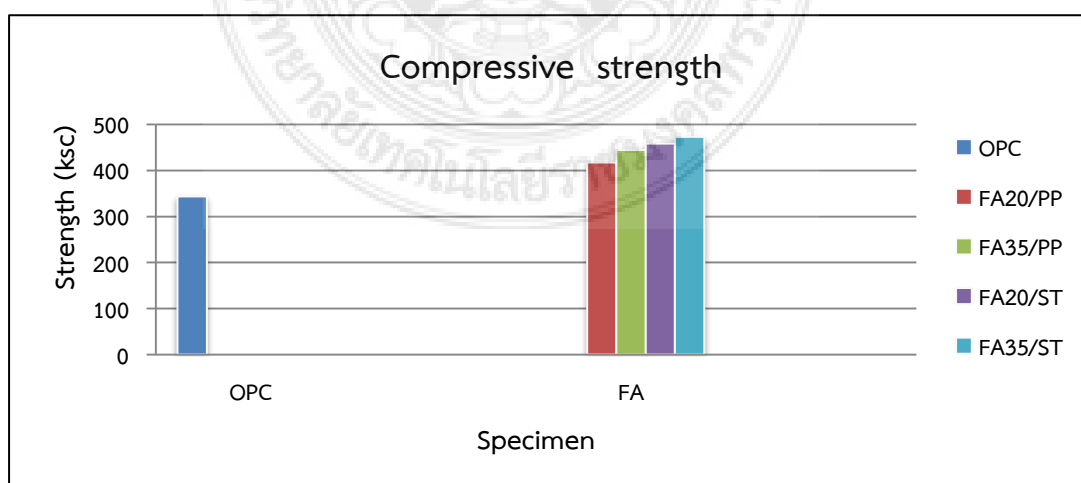
ภาพที่ 4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของคอนกรีตธรรมดา กับคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์

จากภาพที่ 4-1 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตธรรมดาโดยเฉลี่ยปีค่าประมาณ 34.39 KN ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนโดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 36.87 KN ซึ่งสามารถให้กำลังอัดได้มากกว่าคอนกรีตธรรมดา ส่วนคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กสามารถให้กำลังอัดโดยเฉลี่ยที่ 39.86 KN ซึ่งสามารถให้กำลังอัดได้มากกว่าคอนกรีตทั้ง 2 ชนิดซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากผลของเส้นใยโพลีพรอพิลีนที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเนื้อคอนกรีตจึงมีผลทำให้เมื่อนำมาผสมกับคอนกรีต จะมีความสามารถในการรับแรงดัดได้ดี และผลของอิทธิพลของเส้นใยเหล็กที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเหล็กกับเนื้อคอนกรีต เมื่อนำมาผสมกับคอนกรีต จะมีความสามารถในการรับแรงดัดได้ดีที่สุด จึงทำให้มีค่ารับแรงดัดได้มากที่สุด



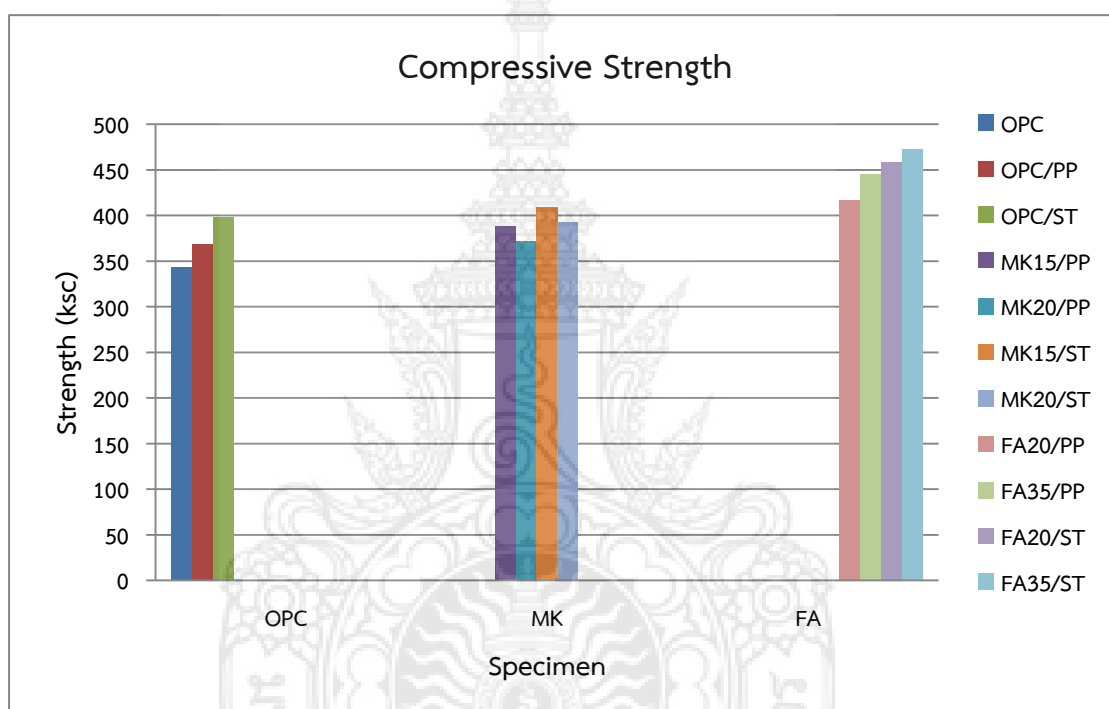
ภาพที่ 4-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของคอนกรีต OPC กับคอนกรีต MK ผสมเส้นใยสังเคราะห์

จากภาพที่ 4-2 พบว่า คอนกรีตปอซโซลานชนิดดินขาว (MK) ปริมาณร้อยละ 15 ของปริมาณคอนกรีตที่ผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนให้กำลังอัดมากกว่า คอนกรีตปอซโซลานชนิดดินขาว (MK) ปริมาณร้อยละ 20 ของปริมาณคอนกรีตที่ผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีน และ คอนกรีตปอซโซลานชนิดดินขาว (MK) ปริมาณร้อยละ 15 ของปริมาณคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กให้กำลังอัดที่มากกว่า คอนกรีตปอซโซลานชนิดดินขาว (MK) ปริมาณร้อยละ 20 ของปริมาณคอนกรีต และปอซโซลานที่ผสมเส้นใยเหล็กทั้ง 2 ตัวอย่างจะให้กำลังอัดที่มากกว่า คอนกรีตปอซโซลานที่ผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนตามลำดับ และ เมื่อผสมปอซโซลานกับเส้นใยทั้งสองชนิดจะทำให้มีคุณสมบัติการรับกำลังอัดดีกว่าคอนกรีตธรรมดา



ภาพที่ 4-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของคอนกรีต OPC กับคอนกรีต FA ผสมเส้นใยสังเคราะห์

จากภาพที่ 4-2 พบว่า คอนกรีตปอซโซลานชนิดเถ้าถ่านหิน (FA) ที่ปริมาณร้อยละ 20 ของปริมาณคอนกรีตที่ผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนให้กำลังอัดน้อยกว่า คอนกรีตปอซโซลานชนิดเถ้าถ่านหิน (FA) ปริมาณร้อยละ 35 ของปริมาณคอนกรีตที่ผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนแต่น้อยกว่า คอนกรีตปอซโซลานชนิดเถ้าถ่านหิน (FA) ปริมาณร้อยละ 20 ของปริมาณคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็ก ก็ให้กำลังอัดที่น้อยกว่าคอนกรีตปอซโซลานชนิดเถ้าถ่านหิน (FA) ปริมาณร้อยละ 35 ของปริมาณคอนกรีตตั้งนั้น ปริมาณเถ้าถ่านหินที่มากก็จะให้กำลังอัดที่มาก และ เส้นใยเหล็กสามารถรับแรงอัดได้ดีกว่าเส้นใยโพลีพรอพิลีน ตามลำดับ และ เมื่อผสมปอซโซลานกับเส้นใยทั้งสองชนิดจะทำให้มีคุณสมบัติการรับกำลังอัดดีกว่าคอนกรีตธรรมดา

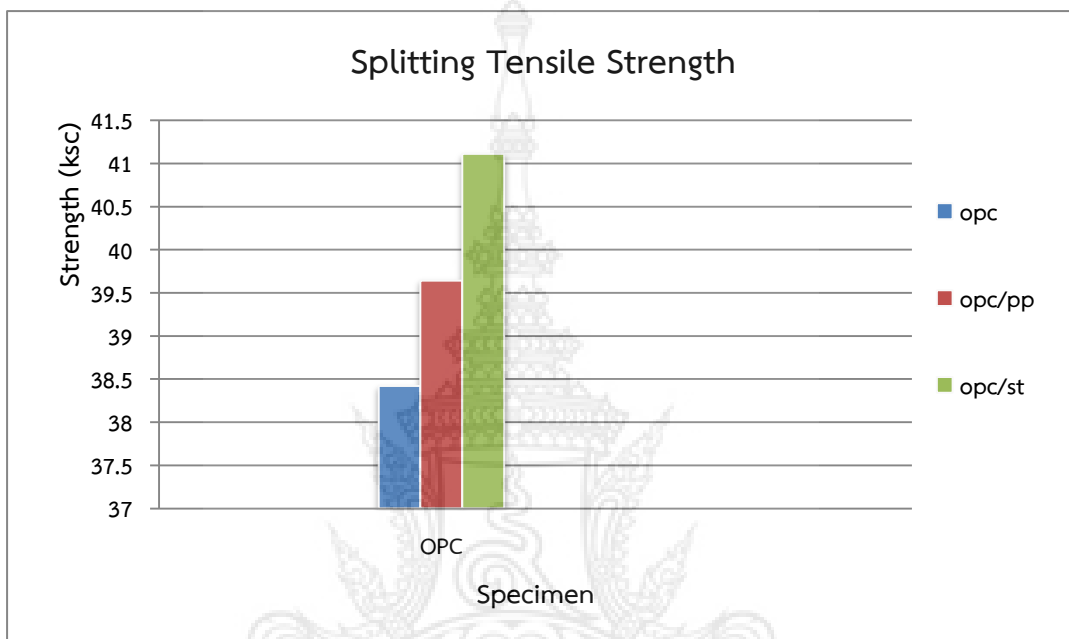


ภาพที่ 4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของคอนกรีต OPC คอนกรีต FA และ คอนกรีต MK ผสมเส้นใยสังเคราะห์



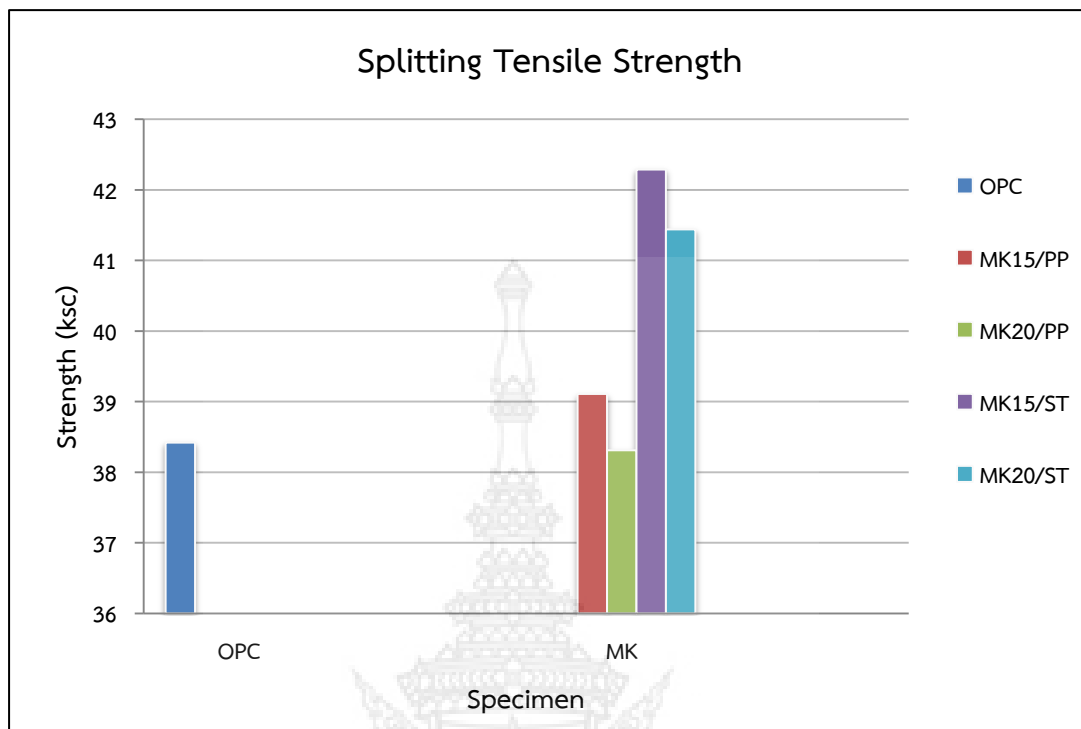
## 4.2 พฤติกรรมการรับแรงดึง

การทดสอบกำลังดึงใช้แบบตัวอย่างทดสอบขนาด 10x20 เซนติเมตร ภายหลังจากหล่อคอนกรีตทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออกซึ่งตัวอย่างทดสอบที่เตรียมได้ จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปบ่มในสถานะ บ่มน้ำ 28 วัน จึงทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C496 ค่า Load-Deflection ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์และคำนวณหาค่าหาค่ากำลังดึง



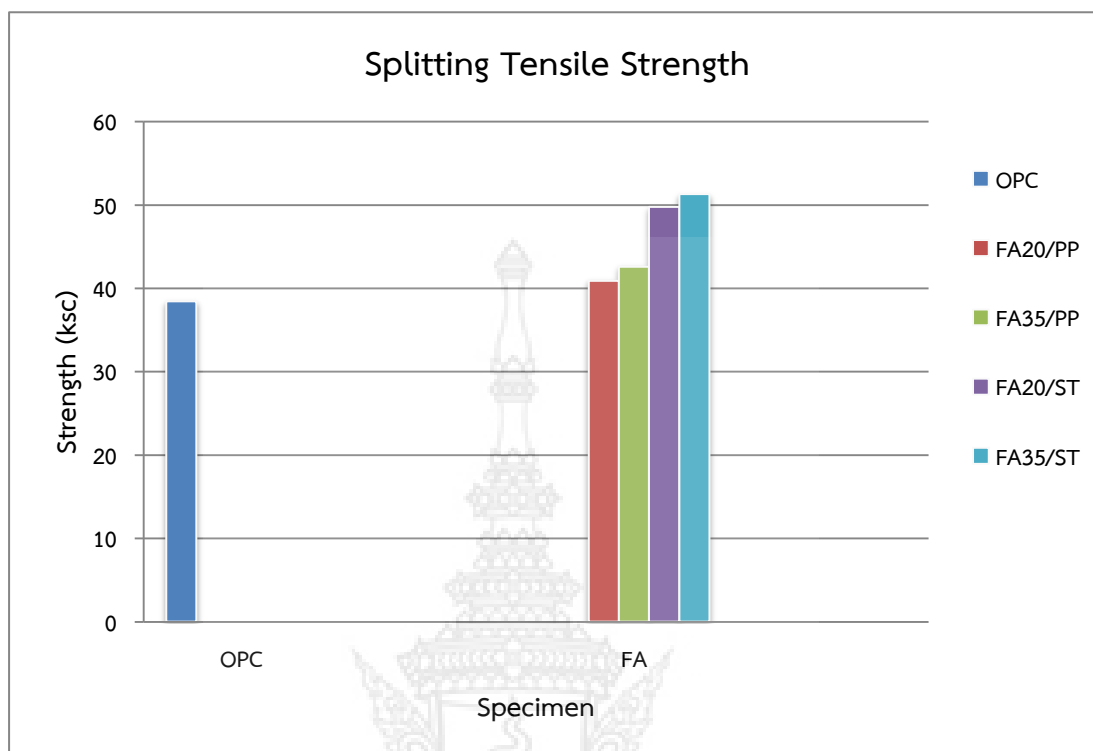
ภาพที่ 4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงของคอนกรีตธรรมดา กับคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์

จากกราฟเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 28 วัน ดังภาพที่ 4-5 ค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตธรรมดามีค่าเฉลี่ยประมาณ 2.94 KN ซึ่งมีกำลังรับแรงดึงน้อยกว่าคอนกรีตผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนโดยมีค่าเฉลี่ยรับแรงดึงประมาณ 3.21 KN ซึ่งมีกำลังรับแรงดึงน้อยกว่าคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กโดยมีค่าเฉลี่ยรับแรงดึงประมาณ 3.75 KN ซึ่งมีผลมาจากอิทธิพลของเส้นใยเหล็กมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเหล็กกับเนื้อคอนกรีต จึงมีผลทำให้เมื่อนำมาผสมในคอนกรีตจะมีความสามารถในการรับแรงดึงได้สูง และผลของอิทธิพลของเส้นใยไฟเบอร์โพลีพรอพิลีน ที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยไฟเบอร์กับเนื้อคอนกรีตได้ค่อนข้างดี จึงมีผลทำให้เมื่อนำมาผสมกับคอนกรีต จะสามารถรับแรงได้ค่อนข้างดี



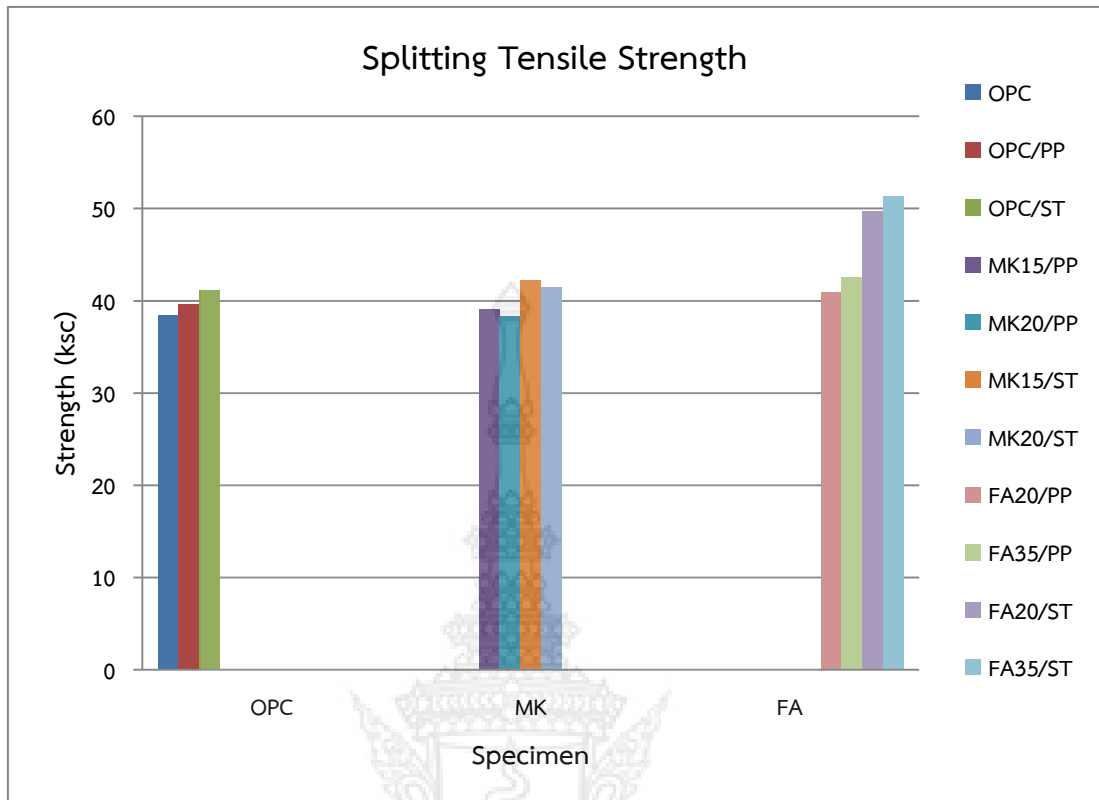
ภาพที่ 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงของคอนกรีต OPC กับคอนกรีต MK ผสมใยสังเคราะห์

จากภาพเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 28 วัน ดังภาพที่ 4-6 ค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตปอซโซลานชนิดดินขาว (MK) ที่ปริมาณร้อยละ 15 ของปริมาณซีเมนต์และผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีน โดยมีค่าเฉลี่ยรับแรงดึงประมาณ 3.11 KN ซึ่งมากกว่าคอนกรีตปอซโซลานชนิดดินขาว (MK) ที่ปริมาณร้อยละ 20 ของปริมาณซีเมนต์ และผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีน ซึ่งมีค่าเฉลี่ยรับแรงดึงประมาณ 2.98 KN และน้อยกว่าคอนกรีตปอซโซลานชนิดดินขาว(MK) ที่ปริมาณร้อยละ 15 ของปริมาณซีเมนต์และผสมเส้นใยเหล็กมีค่าเฉลี่ยเส้นใยรับแรงดึงประมาณ 3.78 KN และมากกว่าคอนกรีตปอซโซลานชนิดดินขาว (MK) ที่ปริมาณร้อยละ 20 ของปริมาณซีเมนต์และผสมเส้นใยเหล็ก ซึ่งมีค่าเฉลี่ยรับแรงดึงประมาณ 3.56 KN ดังนั้นเส้นใยเหล็กสามารถรับแรงดึงมากกว่าเส้นใยโพลีพรอพิลีน และปริมาณดินขาวที่น้อยกว่าก็จะให้กำลังรับแรงดึงได้ดีกว่าปริมาณดินขาวที่มากกว่าตามลำดับ และ เมื่อผสมปอซโซลานกับเส้นใยทั้งสองชนิดจะทำให้มีคุณสมบัติการรับกำลังดึงดีกว่าคอนกรีตธรรมดา



ภาพที่ 4-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงของคอนกรีต OPC กับคอนกรีต FA ผสมเส้นใยสังเคราะห์

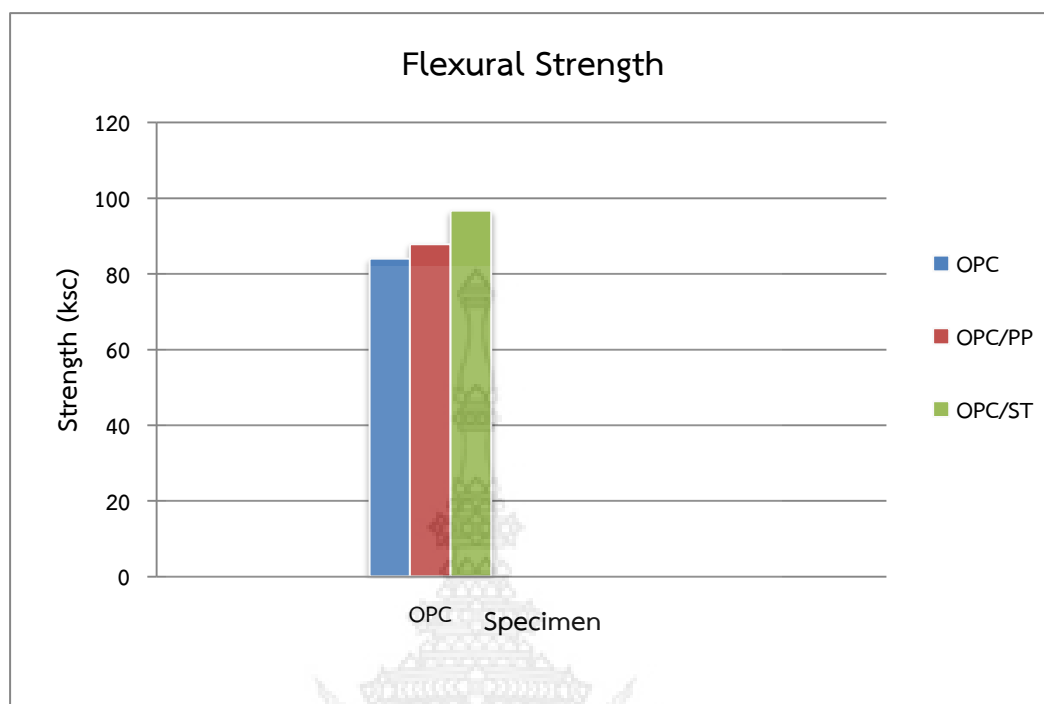
เมื่อผสมปอซโซลานกับเส้นใยทั้งสองชนิดจะทำให้มีคุณสมบัติการรับกำลังดึงดีกว่าจากกาเปรียบ เทียบค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 28 วัน ดังภาพที่ 4-7 ค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตปอซโซลานชนิดเถ้าลอย (FA) ที่ปริมาณร้อยละ 20 ของปริมาณซีเมนต์และผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนซึ่งมีค่าเฉลี่ยรับแรงดึงประมาณ 3.45 KN ซึ่งน้อยกว่าคอนกรีตปอซโซลานชนิดเถ้าลอย (FA) ที่ปริมาณร้อยละ 35 ของปริมาณซีเมนต์ และผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีน ซึ่งมีค่าเฉลี่ยรับแรงดึงประมาณ 3.81 KN ซึ่งน้อยกว่าคอนกรีตปอซโซลานชนิดเถ้าลอยที่ปริมาณร้อยละ 20 ของปริมาณซีเมนต์และผสมเส้นใยเหล็ก ซึ่งมีค่าเฉลี่ยรับแรงดึงประมาณ 5.20 KN ซึ่งน้อยกว่าคอนกรีตปอซโซลานชนิดเถ้าลอยที่ปริมาณร้อยละ 35 ของปริมาณซีเมนต์ และผสมเส้นใยเหล็กมีค่าเฉลี่ยรับแรงดึงประมาณ 5.53 KN ดังนั้นปริมาณเถ้าถ่านหินที่มากก็จะให้กำลังรับแรงดึงมากและเส้นใยเหล็กก็ให้กำลังรับแรงดึงมากกว่าเส้นใยโพลีพรอพิลีนตามลำดับ และคอนกรีตธรรมดา



ภาพที่ 4-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงของคอนกรีต OPC คอนกรีต FA และ คอนกรีต MK ผสมเส้นใยสังเคราะห์

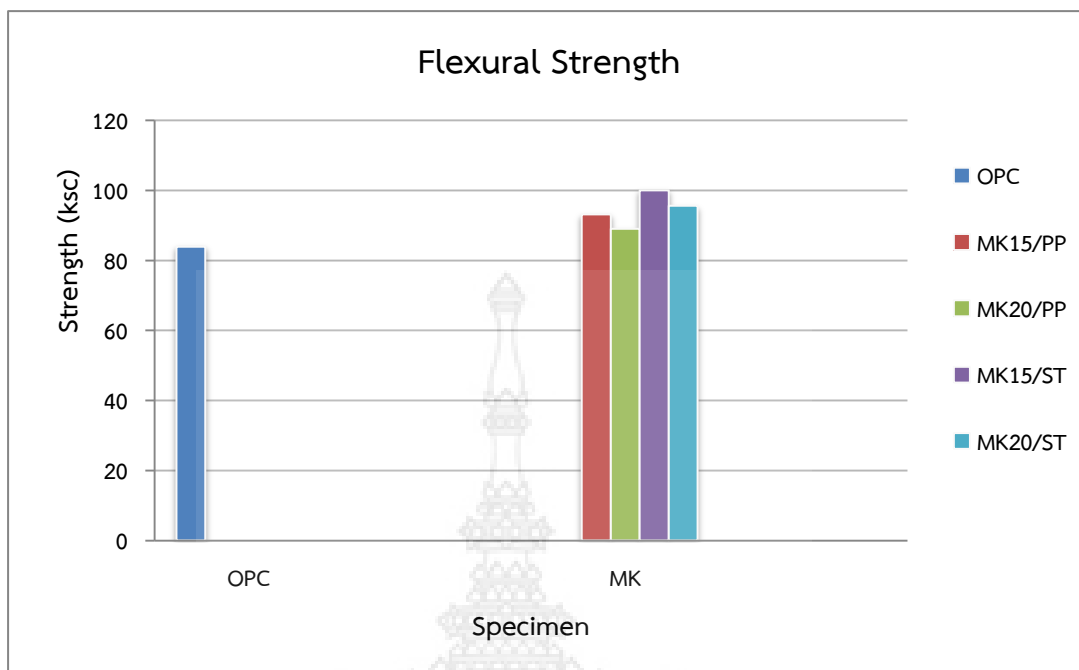
#### 4.3 พฤติกรรมการรับแรงตัด

การทดสอบกำลังตัดใช้แบบตัวอย่างทดสอบขนาด 10x10x35 เซนติเมตร ภายหลังจากหล่อคอนกรีตทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออกซึ่งตัวอย่างทดสอบที่เตรียมได้ จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปบ่มในสภาวะ บ่มน้ำ 28 วัน จึงทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C78 ค่า Load-Deflection ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์และคำนวณหาค่าหาค่ากำลังตัด



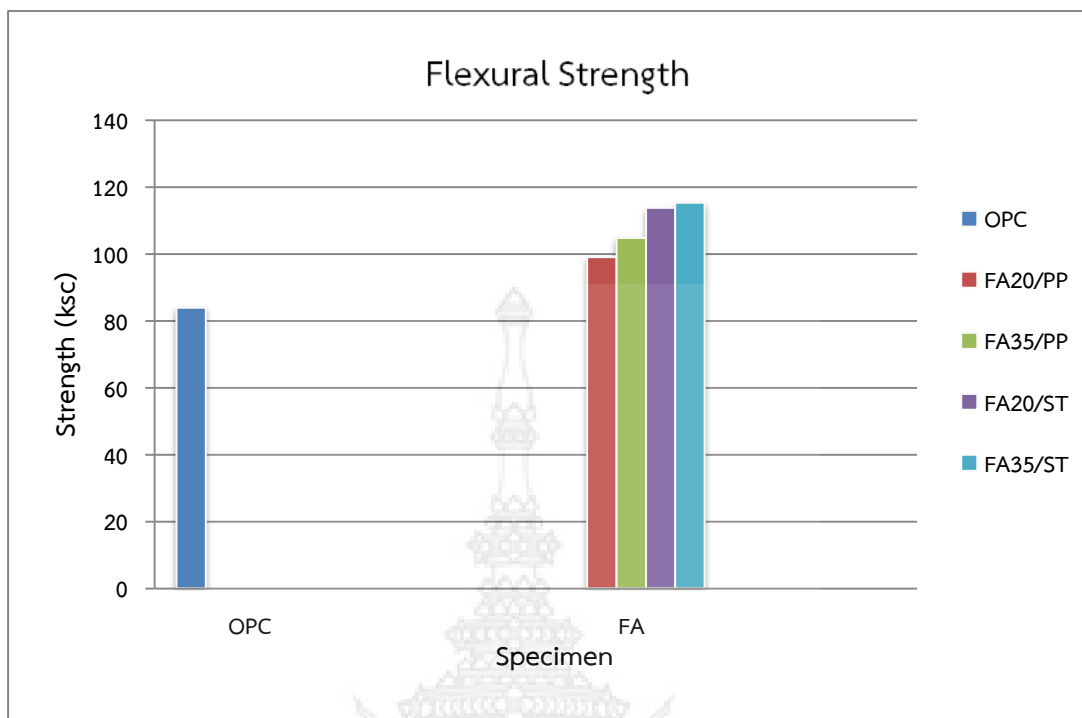
ภาพที่ 4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดัดของคอนกรีตธรรมดา กับคอนกรีตผสมเส้นใยสังเคราะห์

จากกราฟดังกล่าวที่ 4-9 เปรียบเทียบค่ากำลังดัดดังภาพ ค่ากำลังดัดคอนกรีตธรรมดา มีค่าเฉลี่ยประมาณ 18.5 KN ซึ่งมีกำลังดัดน้อยกว่าคอนกรีตผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนโดยมีค่าเฉลี่ยรับแรงดัด 19.1 KN และน้อยกว่าคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก โดยมีค่าเฉลี่ยรับแรงดัดที่ 21.4 KN ซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากผลของเส้นใยโพลีพรอพิลีนที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเนื้อคอนกรีตจึงมีผลทำให้เมื่อนำมาผสมกับคอนกรีตจะมีความสามารถในการรับแรงดัดได้ดี และผลของอิทธิพลของเส้นใยเหล็กที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเหล็กกับเนื้อคอนกรีต เมื่อนำมาผสมกับคอนกรีต จะมีความสามารถในการรับแรงดัดได้ดีที่สุด จึงทำให้มีค่ารับแรงดัดได้มากที่สุด



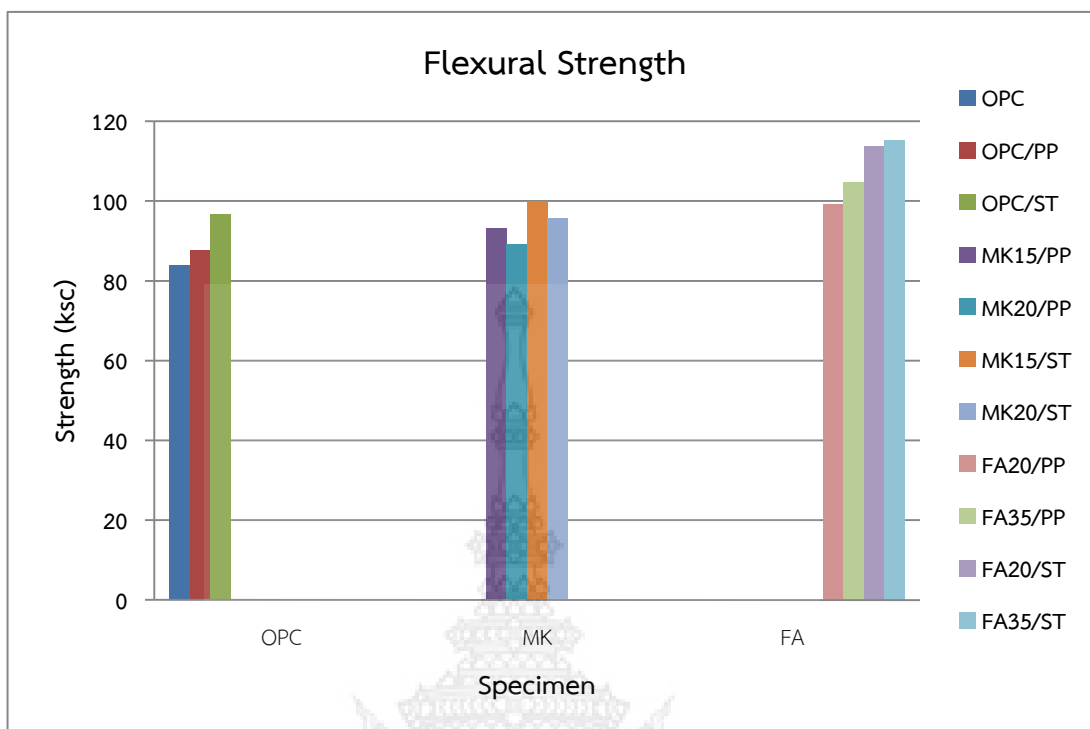
ภาพที่ 4-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังตัดของคอนกรีต OPC กับคอนกรีต MK ผสมเส้นใยสังเคราะห์

จากกราฟเปรียบเทียบค่ากำลังตัดดังภาพที่ 4-10 ได้ว่าค่ากำลังตัดของคอนกรีตปอซโซลานชนิดดินขาว (MK) ที่ปริมาณร้อยละ 20 ของปริมาณซีเมนต์และผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีน มีค่าเฉลี่ยรับแรงตัดที่ 19.6 KN ซึ่งรับแรงตัดได้น้อยที่สุดและคอนกรีตปอซโซลานชนิดดินขาว (MK) ที่ปริมาณร้อยละ 15 ของปริมาณซีเมนต์และผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนรับแรงตัดได้ดีขึ้นโดยมีค่าเฉลี่ยรับแรงตัดที่ 20.2 KN และคอนกรีตปอซโซลานชนิดดินขาว (MK) ที่ปริมาณร้อยละ 20 ของปริมาณซีเมนต์และผสมเส้นใยเหล็ก สามารถรับแรงตัดได้ดีขึ้นโดยมีค่าเฉลี่ยรับแรงตัดที่ 20.7 KN และคอนกรีตปอซโซลานชนิดดินขาว (MK) ที่ปริมาณร้อยละ 15 ของปริมาณซีเมนต์และผสมเส้นใยเหล็กซึ่งสามารถรับแรงตัดได้ดีที่สุด ที่ค่าเฉลี่ยรับแรงตัดที่ 21.8 KN ดังนั้น เส้นใยเหล็กสามารถรับแรงตัดได้มากกว่าเส้นใยโพลีพรอพิลีน และปริมาณดินขาวที่น้อยกว่าสามารถรับแรงตัดได้ดีกว่าตามลำดับ และเมื่อผสมปอซโซลานกับเส้นใยทั้งสองชนิดจะทำให้มีคุณสมบัติการรับแรงตัดดีกว่าคอนกรีตธรรมดา



ภาพที่ 4-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงของคอนกรีต OPC กับคอนกรีต FA ผสมเส้นใยสังเคราะห์

จากกราฟเปรียบเทียบค่ากำลังดัดตั้งภาพที่ 4-11 ได้ว่าค่ากำลังดัดของคอนกรีตปอซโซลานชนิดเถ้าลอย (FA) ที่ปริมาณร้อยละ 20 ของปริมาณซีเมนต์และผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนมีค่าเฉลี่ยรับแรงดัดที่ 21.6 KN ซึ่งมีค่ารับแรงดัดน้อยที่สุดและคอนกรีตปอซโซลานชนิดเถ้าลอย (FA) ที่ปริมาณร้อยละ 35 ของปริมาณซีเมนต์และผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนสามารถรับแรงได้ดีขึ้นโดยมีค่าเฉลี่ยรับแรงดัดที่ 22.8 KN และคอนกรีต ปอซโซลานชนิดเถ้าลอย (FA) ที่ปริมาณร้อยละ 20 ของปริมาณซีเมนต์และผสมเส้นใยเหล็ก ซึ่งสามารถรับแรงดัดได้ดีขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยรับแรงดัดที่ 24.4 KN และคอนกรีตปอซโซลานชนิดเถ้าลอย (FA) ที่ปริมาณร้อยละ 35 ของปริมาณซีเมนต์และผสมเส้นใยเหล็ก ซึ่งสามารถรับแรงดัดได้ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยรับแรงดัดที่ 25.1 KN ดังนั้น เส้นใยเหล็กสามารถรับแรงดัดได้ดีที่สุด และปอซโซลานเถ้าลอยในปริมาณที่มากกว่า ก็สามารถรับแรงดัดได้ดีตามลำดับ และเมื่อผสมปอซโซลานกับเส้นใยทั้งสองชนิดจะทำให้มีคุณสมบัติการรับแรงดัดดีกว่าคอนกรีตธรรมดา

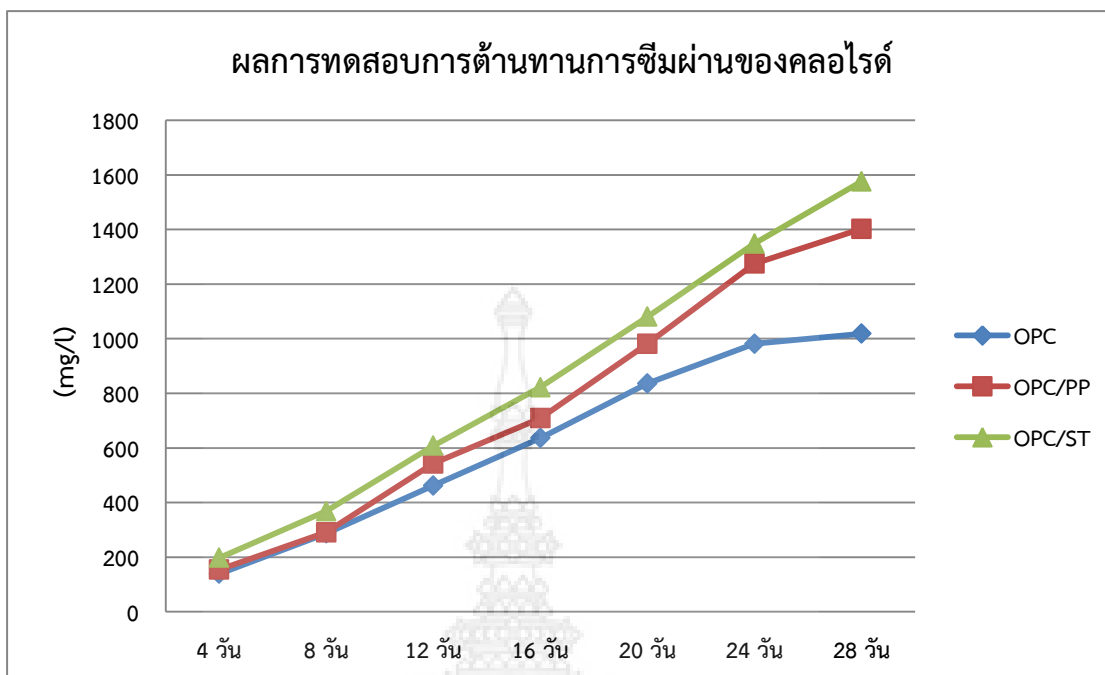


ภาพที่ 4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดัดของคอนกรีต OPC คอนกรีต FA และ MK ผสมเส้นใยสังเคราะห์

#### 4.4 การซึมผ่านของสารละลายในปอซโซลานคอนกรีตด้วยการทดสอบ Chloride Migration Test

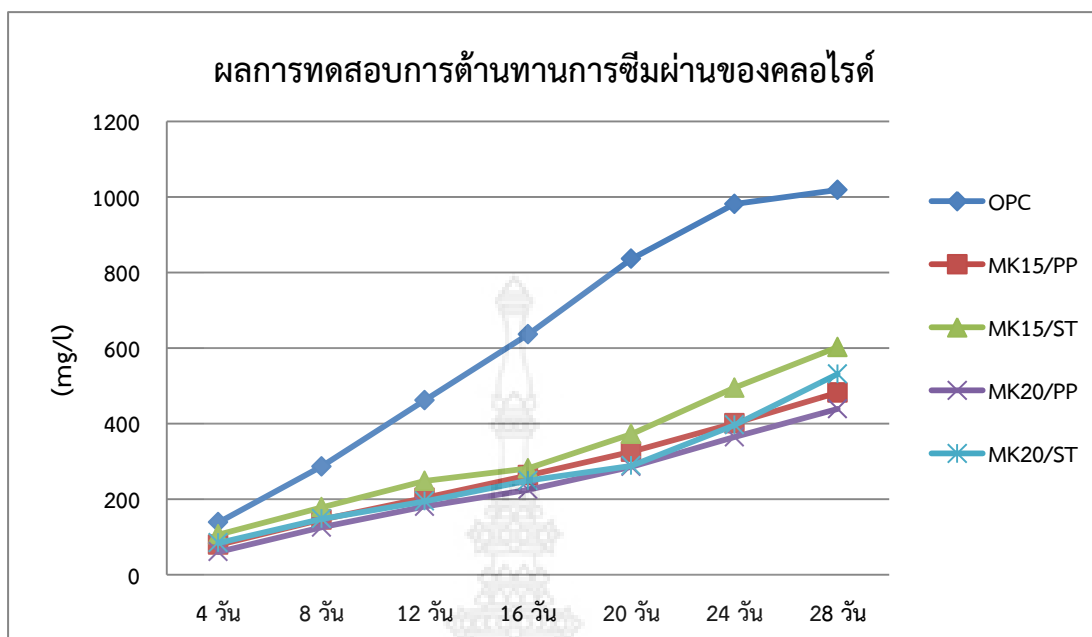
ทำการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยใช้ปฏิกิริยาคส่วนผสมเดียวกันกับข้างต้นและทำการบ่มคอนกรีตเป็นเวลา 28 วันหลังจากนั้นทำการตัดคอนกรีตด้วยเครื่องตัดคอนกรีตเพื่อทำการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้าโดยวิธี Chloride Migration Test โดยใช้สมการของ Nernst planck (Modified Fick's second law) จากมาตรฐาน JSCE -G571-2003 ทำการแช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจากนั้นทำการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด 12 โวลต์ดังแสดงในภาพที่ 3-5 และทำการวัดปริมาณคลอไรด์ไอออนที่อยู่ในสารละลายทุก 4 วันด้วยเครื่อง Chloride Analyzer





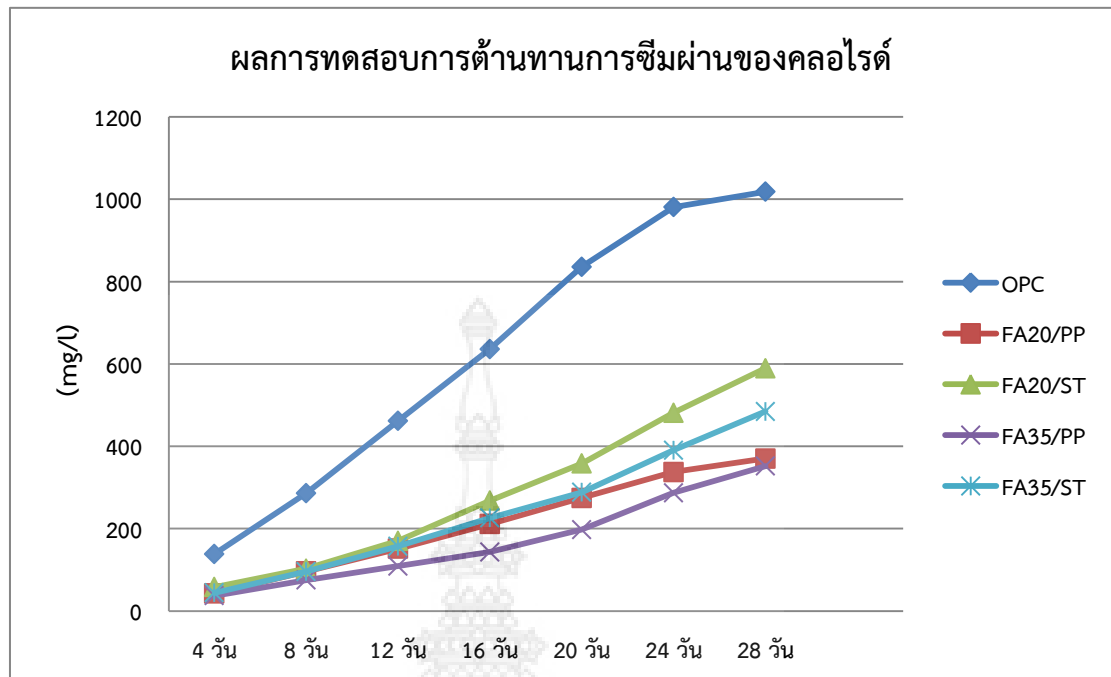
ภาพที่ 4-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์กับเวลาของคอนกรีต OPC

จากภาพที่ 4-13 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์กับเวลาว่า คอนกรีต OPC มีปริมาณคลอไรด์ซึมผ่านน้อยที่สุด และคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีการซึมผ่านของคลอไรด์มากที่สุด รองลงมาคือ คอนกรีตผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีน จะเห็นได้ว่า เมื่อเราใช้เส้นใยโพลีพรอพิลีนและเส้นใยเหล็กผสมเข้าไป จะทำให้ปริมาณคลอไรด์ซึมผ่านได้มากขึ้น เนื่องจากเส้นใยทั้งสองชนิดทำให้เกิดรูพรุนในแท่งคอนกรีต และคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก เมื่อมีอายุการใช้งานที่มากขึ้น เส้นใยเหล็กก็เกิดสนิม และการพุกร่อนทำให้เกิดช่องว่างมากขึ้น ทำให้ปริมาณคลอไรด์ซึมผ่านได้มากที่สุด



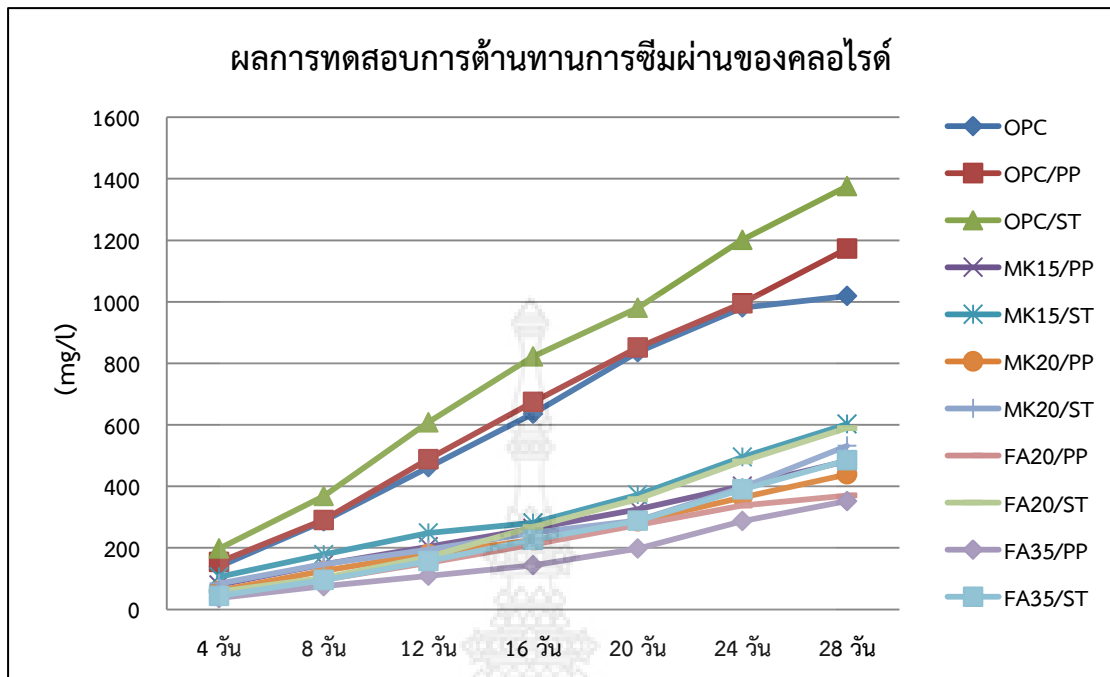
ภาพที่ 4-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์กับเวลาของคอนกรีต MK

จากภาพที่ 4-14 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกับคลอไรด์กับเวลา พบว่า คอนกรีต OPC มีปริมาณคลอไรด์ซึมผ่านมากที่สุด และคอนกรีตแทนที่ด้วย MK ในระดับ 20% ที่ผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีน มีการซึมผ่านคลอไรด์น้อยที่สุด รองลงมาคือ คอนกรีตแทนที่ด้วย MK ในระดับ 15% ที่ผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีน คอนกรีตแทนที่ด้วย MK ในระดับ 20% ที่ผสมเส้นใยเหล็กและ คอนกรีตแทนที่ด้วย MK ในระดับ 15% ที่ผสมเส้นใยเหล็ก มีการซึมผ่านคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า MK ที่แทนที่ในปริมาณมากขึ้นก็จะสามารถลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้มากขึ้น และเส้นใยโพลีพรอพิลีนมีการซึมผ่านคลอไรด์ที่น้อยกว่าเส้นใยเหล็ก เนื่องจาก MK เข้าไปแทรกช่องว่างของคอนกรีตให้มีรูพรุนน้อยลงจึงทำให้คลอไรด์ซึมผ่านได้น้อยกว่าคอนกรีต OPC



**ภาพที่ 4-15** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์กับเวลาของคอนกรีต FA

จากภาพที่ 4-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์กับเวลา พบว่า คอนกรีต OPC มีปริมาณคลอไรด์ซึมผ่านมากที่สุด และคอนกรีตแทนที่ด้วย FA ในระดับ 35% ที่ผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีน มีการซึมผ่านคลอไรด์น้อยที่สุด รองลงมาคือ คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ในระดับ 20% ที่ผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีน คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ในระดับ 35% ที่ผสมเส้นใยเหล็กและคอนกรีตแทนที่ด้วย FA ในระดับ 20% ที่ผสมเส้นใยเหล็ก มีการซึมผ่านคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ จะเห็นได้ว่า FA ที่แทนที่ในปริมาณมากขึ้นก็จะสามารถลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้มากขึ้น และเส้นใยโพลีพรอพิลีนมีการซึมผ่านคลอไรด์ที่น้อยกว่าเส้นใยเหล็ก เนื่องจาก FA เข้าไปแทรกช่องว่างของคอนกรีตให้มีรูพรุนน้อยลงจึงทำให้คลอไรด์ซึมผ่านได้น้อยกว่าคอนกรีต OPC



ภาพที่ 4-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์กับเวลาของคอนกรีต



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สำหรับเนื้อหาในบทที่ 5 นี้ได้กล่าวถึง ผลสรุปของการทดลองทางด้านคุณสมบัติของคอนกรีตธรรมดา เปรียบเทียบกับคอนกรีตปอซโซลานผสมเส้นใยสังเคราะห์ ทั้งด้านคุณสมบัติเชิงกลและด้านการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีต

#### 5.1 คุณสมบัติเชิงกล

##### 5.1.1 พฤติกรรมการรับแรงชนิดอัด

คอนกรีตผสมเส้นใยแต่ละชนิดมีพฤติกรรมการรับแรงแตกต่างกันไปชนิดของเส้นใยการผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนจะมีความยืดหยุ่นตัวสูงกว่าการผสมเส้นใยเหล็กแต่เส้นใยเหล็กสามารถให้กำลังการรับแรงอัดได้สูงกว่า และเมื่อนำมาผสมกับคอนกรีตก็จะเห็นได้ว่า การผสมเส้นใยเหล็กให้กำลังการรับแรงอัดได้ดีที่สุดรองลงมาคือการผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนและคอนกรีตควบคุมรับได้น้อยสุด แต่เมื่อนำมาผสมกับปอซโซลาน (ดินขาว) ก็เห็นได้ว่าในปริมาณดินขาวที่เท่ากัน เส้นใยเหล็กจะให้กำลังการรับแรงอัดได้ดีกว่าการผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนและปริมาณดินขาวที่น้อยในการผสมกับคอนกรีต จะให้กำลังการรับแรงที่ดีกว่าปริมาณดินขาวที่มากทั้งการผสมเส้นใยทั้งสองชนิด แต่เมื่อนำมาผสมกับปอซโซลานชนิดเถ้าลอย จะเห็นได้ว่าการผสมเส้นใยเหล็กจะให้กำลังการรับแรงอัดได้ดีกว่า การผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนและปริมาณเถ้าลอยที่ผสมกับคอนกรีตยิ่งมากขึ้นก็จะให้กำลังการรับแรงอัดได้มากขึ้นเช่นกัน

##### 5.1.2 พฤติกรรมการรับแรงชนิดดัด

คอนกรีตผสมเส้นใยแต่ละชนิดมีพฤติกรรมการรับแรงแตกต่างกันไปชนิดของเส้นใยการผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนจะมีความยืดหยุ่นตัวสูงกว่าการผสมเส้นใยเหล็กแต่เส้นใยเหล็กสามารถให้กำลังการรับแรงดัดได้สูงกว่า และเมื่อนำมาผสมกับคอนกรีตก็จะเห็นได้ว่า การผสมเส้นใยเหล็กให้กำลังการรับแรงดัดได้ดีที่สุดรองลงมาคือการผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีน และคอนกรีตควบคุมรับได้น้อยสุด แต่เมื่อนำมาผสมกับปอซโซลาน (ดินขาว) ก็เห็นได้ว่าในปริมาณดินขาวที่เท่ากันเส้นใยเหล็กจะให้กำลังการรับแรงดัดได้ดีกว่าการผสมเส้นใยพลาสติกโพลีพรอพิลีนและปริมาณดินขาวที่น้อยในการผสมกับคอนกรีต จะให้กำลังการรับแรงที่ดีกว่าปริมาณดินขาวที่มาก ทั้งการผสมเส้นใยทั้งสองชนิด แต่เมื่อนำมาผสมกับปอซโซลานชนิดเถ้าลอย จะเห็นได้ว่าการผสมเส้นใยเหล็กจะให้กำลังการรับแรงดัดได้ดีกว่า การผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนและปริมาณเถ้าลอยที่ผสมกับคอนกรีตยิ่งมากขึ้นก็จะให้กำลังการรับแรงดัดได้มากขึ้นเช่นกัน

##### 5.1.3 พฤติกรรมการรับแรงชนิดดึง

คอนกรีตผสมเส้นใยแต่ละชนิดมีพฤติกรรมการรับแรงแตกต่างกันไปชนิดของเส้นใยการผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนจะมีความยืดหยุ่นตัวสูงกว่าการผสมเส้นใยเหล็กแต่เส้นใยเหล็กสามารถให้กำลัง

การรับแรงดึงได้สูงกว่า และเมื่อนำมาผสมกับคอนกรีตก็จะเห็นได้ว่า การผสมเส้นใยเหล็กให้กำลังการรับแรงดึงได้ดีที่สุดรองลงมาคือการผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนและคอนกรีตควบคุมรับได้น้อยสุด แต่เมื่อนำมาผสมกับปอชโซลาน (ดินขาว) ก็เห็นได้ว่าในปริมาณดินขาวที่เท่ากัน เส้นใยเหล็กจะให้กำลังการรับแรงดึงได้ดีกว่าการผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนและปริมาณดินขาวที่น้อยในการผสมกับคอนกรีต จะให้กำลังการรับแรงดึงที่ดีกว่าปริมาณดินขาวที่มากทั้งการผสมเส้นใยทั้งสองชนิด แต่เมื่อนำมาผสมกับปอชโซลานชนิดแก้ล้อย จะเห็นได้ว่าการผสมเส้นใยเหล็กจะให้กำลังการรับแรงดึงได้ดีกว่าการผสมเส้นใยโพลีพรอพิลีนอย่างชัดเจนและปริมาณแก้ล้อยที่ผสมกับคอนกรีตยิ่งมากขึ้นก็จะให้กำลังการรับแรงดึงได้มากขึ้นเช่นกัน

## 5.2 การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีต

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์กับเวลาของคอนกรีตและปริมาณของปอชโซลานที่ผสมเส้นใยสังเคราะห์แต่ละชนิด พบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านคอนกรีตธรรมดาที่มีปริมาณมากที่สุด แต่เมื่อแทนที่คอนกรีตด้วยปอชโซลานทั้ง 2 ชนิด ที่ผสมกับเส้นใยสังเคราะห์ทั้ง 2 ชนิด มีปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์น้อยลง และความต้านทานคลอไรด์พบว่า คอนกรีตที่ผสมแก้ล้อย 20% จะมีความต้านทานคลอไรด์ได้ดีที่สุด และเส้นใยโพลีพรอพิลีนจะมีความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ได้ดีกว่าเส้นใยเหล็ก และเส้นใยเหล็กเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นจะมีค่าการซึมผ่านคลอไรด์ที่มากขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากเส้นใยเหล็กจะเกิดสนิมและผุกร่อนจากการสัมผัสกับคลอไรด์ ทำให้เกิดช่องว่างมากขึ้น จึงส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ซึมผ่านได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าต้านทานปริมาณคลอไรด์ก็ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาทดลองนี้ผลที่ได้เป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับแนวทางการนำเส้นใยสังเคราะห์มาใช้ในงานคอนกรีต และแนวทางการนำวัสดุปอชโซลานมาใช้เป็นส่วนผสมกับเส้นใยสังเคราะห์มาใช้ โดยได้ศึกษาถึงอิทธิพลของชนิดและปริมาณของวัสดุปอชโซลานผสมเส้นใยสังเคราะห์ ซึ่งผู้ที่ได้ทำการศึกษาทดลองขอเสนอแนวทางไว้สำหรับผู้สนใจทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงด้านคุณสมบัติด้านอื่นๆ เช่น ความต้านทานการสึกหรอ การต้านทานการเสียดสี การต้านทานต่อการกัดกร่อนโดยกรดซัลเฟต

## บรรณานุกรม

1. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2543. ความคงทนของคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท จุฑทอง จำกัด, กรุงเทพฯ
2. ปิติ สุกนธสุขกุล และสุรชัย สุทธิธรรมมา. ดรรชนีความเหนียวคอนกรีตผสมเส้นใยไฟเบอร์เหล็กและพลาสติกสังเคราะห์โดยการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM และ JSCE. เอกสารการประชุมวิชาการคอนกรีต. ประจำปี ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : 2549.
3. ปิติ สุกนธสุขกุล และสุรชัย สุทธิธรรมมา. ดรรชนีความเหนียวคอนกรีตผสมเส้นใยไฟเบอร์เหล็กและพลาสติกสังเคราะห์โดยการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM และ JSCE. เอกสารการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : 2549.
4. ASTM DESIGNATION : C78-94, Standard Test Method for Flexural Strength of B. Elsener and U.Angst. 2007. Mechanism of Electrochemical Chloride Removal.
5. ปิติ สุกนธสุขกุล. คอนกรีตขั้นพื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ศูนย์ผลิตตำราเรียน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549.
6. บัญชา สุปรินายก และคณะ. พฤติกรรมของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กและเส้นใยโพลีพรอพิลีน, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2542.
7. ASTM DESIGNATION : C1018-97: Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading).
8. พิชัย เลี่ยมพิพัฒน์. พลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 14. กรุงเทพฯ : ห.จ.ก.ป.สัมพันธ์พาณิชย์, 2540.
9. วันชัย ยอดสุดใจ. 2548. การลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี. โยธาสาร: 49-51
10. ประพนธ์ เพ็องฟู. พฤติกรรมของคอนกรีตผสมเส้นใยและการต้านทานแรงกระแทกด้วยวิธีตีมน้ำหนัก, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555
11. วรเชษฐ์ ป้อมเชียงใหม่, คุณสมบัติเชิงกลของคานคอนกรีตผสมเส้นใยหลังการเผาไหม้, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.
12. วรเดช สีดา, การศึกษาความทนทานของคอนกรีตผสมเส้นใยในปริมาณสูง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546.
13. จิรวัดน์ สุวรรณพฤษ, ผลของดินขาวต่อกำลังและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546.
14. ปิติ สุกนธสุขกุล สมยศ วิวัฒน์พัฒนพงศ์ รณรงค์ แสงพันธ์, พฤติกรรมการรับแรงดัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กและเส้นใยโพลีพรอพิลีน, การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ, ครั้งที่ 2

15. Bentur A. and Mindess S. "Fiber Reinforced Cementitious Composites.", *Journal of Cement and Concrete Research*. 20 (1990) : 324-340.
16. W. Prince and R. Gagne. 2001. The Effects of Types of Solutions used in Accelerated chloride Migration Tests for Concrete. *Cement and Concrete Research*. Pergamon. *Cement and Concrete Research* 31. 775-780
17. Rob B. Polder. 1995. Electrochemical Chloride Removal from Concrete Prisms Containing Chloride Penetrated from Sea Water. *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd. Vol. 10. No. 1: 83-88
18. P.F. Megrath and R.D. Hooton. 1996. Influence of Voltage on Chloride Diffusion Coefficients from Chloride Migration Tests. *Cement and Concrete Research*. Elsevier
19. J.M. Miranda, J.A. Gonzalez, A. Cobo and E. Otero. 2006. Several Questions about Electrochemical Rehabilitation Methods for Reinforced Concrete Structure Corrosion Science. Elsevier Ltd. *Corrosion Science* 48: 2172-2188
20. O.Mejlhede Jensen, P. Freiesleben Hansen, A.M. Coats, F.P. Glasser. 1999. Chloride Ingress in Cement Paste and Mortar. *Cement and Concrete Research*. Pergamon. *Cement and Concrete Research* 29: 1497-1504
21. S. Mindess, J.F. Young and D. Darwin. 2003. *Concrete*. Prentice Hall, Inc., New Jersey
22. A. Lau and M. Anson. "Effect of high temperatures on high performance steel fiber reinforced concrete." *Journal of Cement and Concrete Research*. 36 (2006) : 1698-1707.
23. Gerardo G. Clemena and Donald R. Jackson, 2000. Trial Application of Chloride Extraction on Concrete Bridge Components in Virginia. Virginia Transportation Research Council. U.S. Department of Transportation. VTRC 00-R18



ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง



ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบกำลังอัด

Compressive strength						
Specimen	Weigth (kg)	Load (kn)	Avg. Load (kn)	Area	Strength (ksc)	Avg.Strength (ksc)
OPC	2.45	334.42	337.43	100	340.9	343.9
	2.40	341.19		100	347.8	
	2.40	336.68		100	343.2	
OPC/PP	2.35	367.38	358.73	100	374.5	368.7
	2.40	362.87		100	369.9	
	2.35	345.93		100	261.8	
OPC/ST	2.40	400.54	371.06	100	408.3	398.6
	2.40	387.20		100	394.7	
	2.40	385.43		100	392.9	
MK15/PP	2.30	379.10	380.84	100	386.4	388.25
	2.35	391.52		100	399.1	
	2.35	371.90		100	379.2	
MK20/PP	2.35	365.03	365.39	100	372.1	372.4
	2.30	354.83		100	361.7	
	2.35	376.31		100	383.6	
MK15/ST	2.45	402.99	401.46	100	410.8	409.28
	2.40	394.66		100	402.3	
	2.40	406.72		100	414.6	
MK20/ST	2.40	379.75	385.34	100	387.1	392.76
	2.40	382.39		100	389.9	
	2.40	393.87		100	401.5	
FA20/PP	2.40	395.74	409.11	100	403.4	417.07
	2.35	409.67		100	417.6	
	2.35	421.93		100	430.1	
FA35/PP	2.40	432.92	436.32	100	441.3	444.77
	2.35	441.55		100	450.1	
	2.35	434.48		100	442.9	
FA20/ST	2.45	455.87	449.5	100	464.7	458.20
	2.40	441.74		100	450.3	
	2.40	450.87		100	459.6	
FA35/ST	2.40	463.82	463.98	100	472.8	472.98
	2.40	471.27		100	480.4	
	2.40	456.85		100	465.7	

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบกำลังดัด

Flexural Strength						
Specimen	Weigth (kg)	Load (kn)	Avg. Load (kn)	Area	Strength (ksc)	Avg.Strength (ksc)
OPC	8.70	17.8	18.3	100	81.65	83.94
	8.75	19.1		100	87.61	
	8.60	18.0		100	82.57	
OPC/PP	8.75	18.8	19.1	100	86.24	87.77
	8.65	20.2		100	92.66	
	8.70	18.4		100	84.40	
OPC/ST	8.80	19.7	21.07	100	90.37	96.64
	8.60	20.6		100	94.49	
	8.70	22.9		100	105.05	
MK15/PP	8.50	21.4	20.3	100	98.16	93.12
	8.50	19.9		100	91.29	
	8.55	19.6		100	89.91	
MK20/PP	8.50	19.1	19.4	100	87.62	88.99
	8.50	21.3		100	97.71	
	8.60	17.8		100	81.65	
MK15/ST	9.10	23.5	21.97	100	105.5	100.00
	9.10	21.1		100	96.79	
	9.00	21.3		100	97.71	
MK20/ST	9.10	20.2	20.8	100	92.66	95.57
	9.05	19.2		100	88.08	
	9.00	23.1		100	105.96	
FA20/PP	8.45	23.3	21.6	100	106.88	99.08
	8.50	20.6		100	94.49	
	8.45	20.9		100	95.87	
FA35/PP	8.65	22.7	22.8	100	104.13	104.74
	8.70	21.9		100	100.46	
	8.70	23.9		100	109.64	
FA20/ST	8.80	24.2	24.8	100	111.01	113.76
	8.85	23.9		100	109.63	
	8.90	26.3		100	120.64	
FA35/ST	8.85	25.2	25.1	100	115.59	115.29
	8.85	23.9		100	109.63	
	8.90	26.3		100	120.65	

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบกำลังดึง

Splitting Tensile Strength					
Specimen	Weigth (kg)	Load (kn)	Avg. Load (kn)	Strength (ksc)	Avg.Strength (ksc)
OPC	3.70	241.5	18.3	39.18	38.42
	3.70	236.3		38.34	
	3.70	232.6		37.73	
OPC/PP	3.70	247.3	19.1	40.12	39.64
	3.65	240.8		39.07	
	3.65	244.8		39.72	
OPC/ST	3.75	255.2	21.07	41.40	41.11
	3.80	259.1		42.04	
	3.75	245.8		39.88	
MK15/PP	3.65	240.7	20.3	39.05	39.11
	3.60	243.2		39.46	
	3.65	239.3		38.82	
MK20/PP	3.65	236.8	19.4	38.42	38.31
	3.65	237.9		38.60	
	3.65	233.6		37.90	
MK15/ST	3.80	264.5	21.97	42.91	42.29
	3.75	253.9		41.19	
	3.80	263.7		42.78	
MK20/ST	3.75	255.4	20.8	41.44	41.44
	3.75	257.8		41.83	
	3.75	253.1		41.06	
FA20/PP	3.70	248.7	21.6	40.35	40.88
	3.70	258.1		41.87	
	3.70	249.2		40.43	
FA35/PP	3.70	260.3	22.8	42.23	42.58
	3.65	273.8		44.42	
	3.70	253.2		41.08	
FA20/ST	3.75	299.3	24.8	28.56	49.74
	3.80	308.8		50.10	
	3.80	311.7		50.57	
FA35/ST	3.75	318.7	25.1	51.57	51.29
	3.75	316.8		51.40	
	3.75	312.9		50.77	

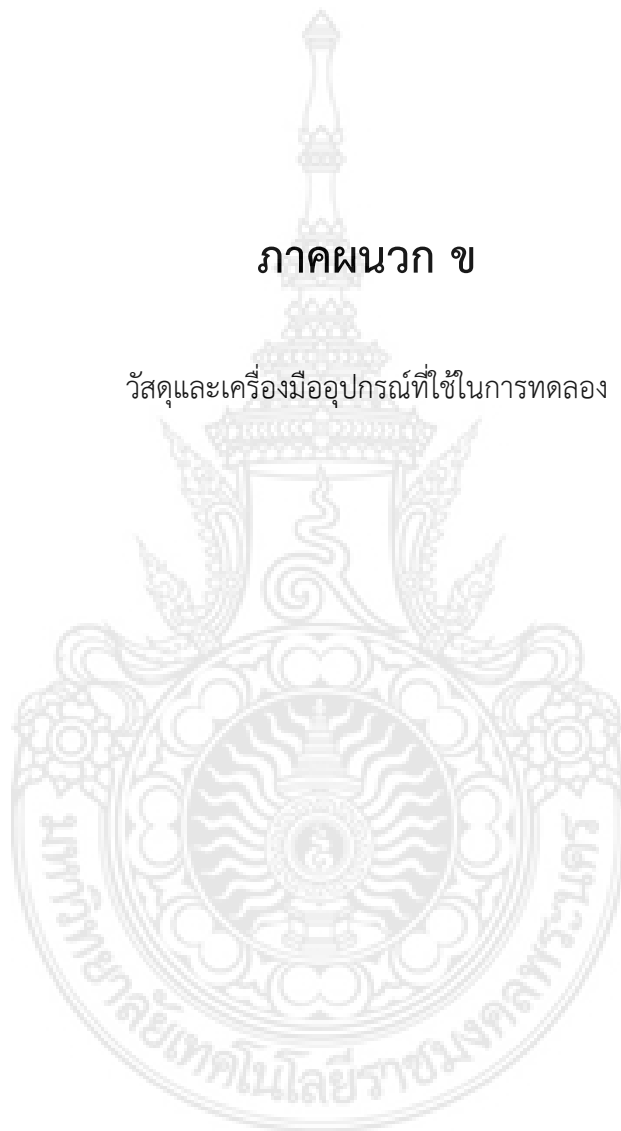
ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์

ชนิดของวัสดุ	ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ (mg/l)						
	4 วัน	8 วัน	12 วัน	16 วัน	20 วัน	24 วัน	28 วัน
OPC	138.75	286.46	462.03	636.23	836.17	981.24	1,018.47
OPC/PP	154.06	290.78	542.88	708.48	981.21	1,275.14	1,402.61
OPC/ST	197.61	368.19	608.09	821.87	1,080.27	1,348.15	1,575.84
FA(20)/PP	42.71	96.21	151.24	211.37	274.85	337.52	370.4
FA(20)/ST	57.93	102.92	170.53	268.08	358.35	481.37	589.41
FA(35)/PP	37.05	75.28	109.13	143.33	197.68	286.96	352.13
FA(35)/ST	44.15	95.74	157.26	226.09	288.37	390.36	484.68
MK(15)/PP	79.41	145.94	203.68	263.31	325.64	400.85	482.17
MK(15)/ST	106.28	178.58	248.42	281.63	372.38	495.17	602.44
MK(20)/PP	60.73	125.43	180.51	225.03	286.15	364.28	438.92
MK(20)/ST	84.27	147.82	194.58	249.38	288.47	396.35	531.58



## ภาคผนวก ข

วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง





ภาพที่ ข.1 เครื่องทดสอบกำลังของคอนกรีต



ภาพที่ ข.2 แบบหล่อคอนกรีตตัวอย่าง



ภาพที่ ข.3 เครื่องมือผสมคอนกรีต



ภาพที่ ข.4 เครื่องสั่นคอนกรีต





ภาพที่ ข.5 โต๊ะทดสอบการไหลผ่าน (Flow table)



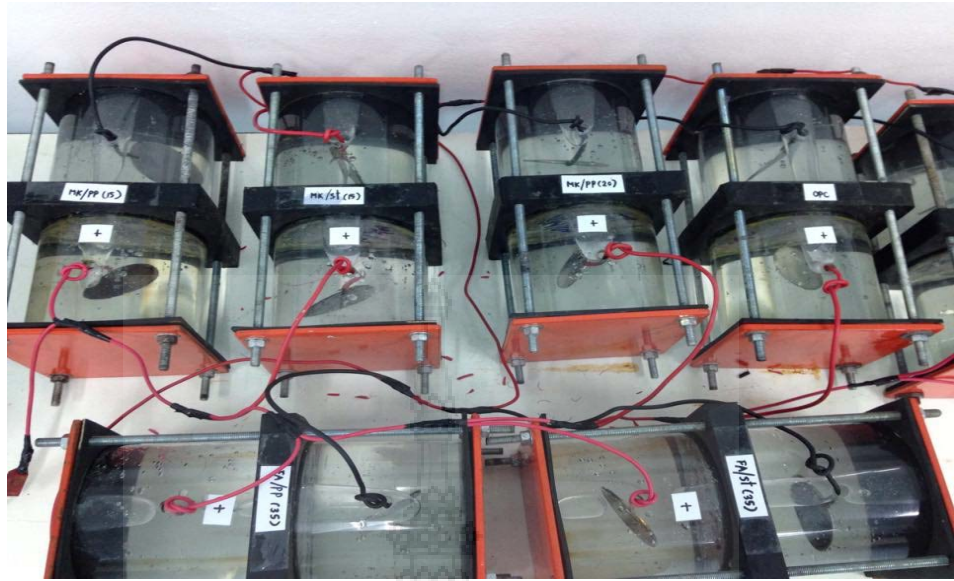
ภาพที่ ข.6 ถังสำหรับแช่ตัวอย่าง



ภาพที่ ข.7 เครื่องชั่งน้ำหนัก



ภาพที่ ข.8 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสตรง และเครื่องวัดกระแสไฟ



ภาพที่ ข.9 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์



ภาพที่ ข.10 สารเคมีสำหรับการไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์





ภาพที่ ข.10 เครื่องร่อนทรายตะแกรงแบบใช้ไฟฟ้า



ภาพที่ ข.11 เครื่องร่อนหินตะแกรงแบบใช้ไฟฟ้า



ภาพที่ ข.12 เส้นใยเหล็ก



ภาพที่ ข.13 เส้นใยโพลีพรอพิลีน



ภาพที่ ข.14 เถ้าถ่านหิน



ภาพที่ ข.15 ดินขาว

ภาคผนวก ค

วิธีการทดลอง







ภาพที่ ค.1 การทดสอบการไหลแผ่



ภาพที่ ค.2 เตรียมส่วนผสมทั้งหมด





ภาพที่ ค.3 ผสมอัตราส่วนทุกอย่างให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน



ภาพที่ ค.4 เทส่วนผสมลงใส่ในแบบหล่อ



ภาพที่ ค.5 ตัวอย่างคอนกรีตทดสอบแบบทรงกระบอก



ภาพที่ ค.6 ตัวอย่างคอนกรีตทดสอบแบบทรงลูกบาศก์



ภาพที่ ค.7 ตัวอย่างคอนกรีตทดสอบแบบคาน



ภาพที่ ค.8 บ่มตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมดที่ 28 วัน



ภาพที่ ค.9 การทดสอบกำลังอัด



ภาพที่ ค.10 การทดสอบกำลังดึง



ภาพที่ ค.11 การทดสอบกำลังอัด



ภาพที่ ค.12 เตรียมตัดคอนกรีตหนา 1 ซม.เพื่อนำไปประกอบเข้ากับเครื่องทดสอบ

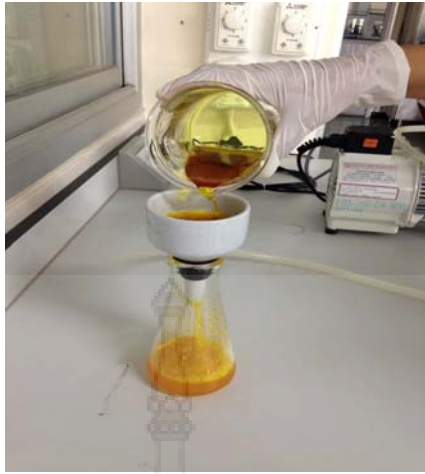


ภาพที่ ค.13 ประกอบและต่อวงจรไฟฟ้าทั้งระบบ



ภาพที่ ค.13 เก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 4 วัน





ภาพที่ ค.14 การเตรียมสารละลายเพื่อใช้ในการไตเตรท



ภาพที่ ค.15 การไตเตรท การซึมผ่านของคลอไรด์

## ภาคผนวก ง

คุณสมบัติของเส้นใยที่ใช้ในการทำการทดลอง





# เส้นใยโพลีพรอพิลีน

PRODUCT DATA SHEET

BEKAERT

## Synmix®

Macro synthetic fibres  
for concrete

BEKAERT

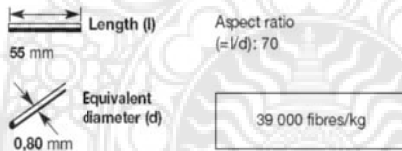
### Description:

Synmix® 55 is a structural synthetic fibre for concrete.

### Applications:

- mining, only for temporary support,  
not suited for permanent support

### Geometry:



### Quality:

Synmix® is produced at an ISO 9002 certified plant.

## Recommendations - mixing

### 1. General

- ✓ preferably use a central batching plant mixer
- ✓ a continuous grading is preferred
- ✓ mix until all fibres are homogeneously spread over the mix
- ✓ if special cements or admixtures are used, a preliminary test is recommended

### 2. Fibre addition

#### 2.1. In batching plant mixer

- ✓ never add fibres as first component in the mixer
- ✓ fibres can be introduced together with sand and aggregates, or added in freshly mixed concrete

#### 2.2. Truckmixer

- ✓ run mixer at drum speed: 12-18 rpm
- ✓ adjust slump to a min. of 12 cm (preferably with water reducing agents or high water reducing agents)
- ✓ add the fibres at maximum speed of 5 kg/min
- ✓ after adding the fibres, continue mixing at highest speed for 4-5 min. (± 70 rotations)

## Recommendations - storage



Protect the pallets against rain



Do not stack the pallets on top of each other

Delivered in

Boxes of  
5 kg  
on pallet

N.V. Bekaert S.A.  
Bekaertstraat 2 - 8550 Zvevegem - Belgium  
Tel. +32 (0) 56 / 76 69 86 - Fax +32 (0) 56 / 76 79 47  
Internet: <http://www.bekaert.com/building>

Values are indicative only. Modifications reserved. All details describe our products in general form only. For ordering and design only use official specifications and documents.  
N.V. Bekaert S.A. 2003

## FEATURES & BENEFITS

- Geometrically engineered to resist matrix pullout
- Increases flexural toughness
- Reduces rebound
- Increases cohesion and reduces segregation
- Increases impact and shatter resistance
- Non-magnetic
- Rustproof
- Chemically inert and alkali proof
- Reduced wear on concrete pumps and hoses
- Safe and easy to handle
- Simplified logistics
- Economical alternative to steel wire mesh and/or steel fibers
- Reduced plastic shrinkage cracking
- Alternative to traditional reinforcement
- Improved impact, shatter and abrasion resistance
- Improved residual strength
- Reduced water migration and damage from freeze/thaw
- Improved durability
- Areas requiring non-metallic materials

## PRIMARY APPLICATIONS

- Ground support and stabilization
- Marine structure repair and rehabilitation
- Retaining walls and soil nailing
- Lining large underground cavities
- Aqueduct rehabilitation
- Mining
- Structural rehabilitation
- Seismic retrofits
- Channel linings
- Slope stabilization
- Pools
- Tanks

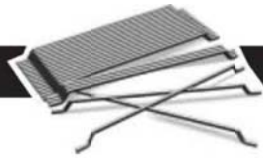
## COMPLIANCE

Complies with ASTM C III6/C III6M, Type III fiber reinforced concrete.

## CHEMICAL AND PHYSICAL PROPERTIES:

Absorption	Nil	Melt Point	328°F (164°C)
Specific Gravity	0.91	Ignition Point	1022°F (>550°C)
Fiber Length	2.0 in (50 mm)	Thermal Conductivity	Low
Electrical Conductivity	Low	Alkali Resistance	Alkali Proof
Acid & Salt Resistance	High		

# เส้นใยเหล็ก



PRODUCT DATA SHEET BEKAERT

## Dramix®



- Description:** Dramix® fibres are filaments of wire, deformed and cut to lengths, for reinforcement of concrete, mortar and other composite materials. Dramix® RC-65/35-BN is a cold drawn wire fibre, with hooked ends, and glued in bundles.

- Applications:**
  - shotcrete
  - screeds
  - precast
  - overlays
  - compression layers

- Geometry:**
  - Length (l): 35 mm
  - Diameter (d): 0,55 mm
  - Performance class: 65
  - Aspect ratio (= l/d): 64
  - 14 500 fibres/kg

- Tensile strength:**
  - on the wire: minimum 1100 N/mm<sup>2</sup>
  - low carbon conforms to EN 10016-2 - C9D

- Coating:** None

Conforms to <b>ASTM A820</b>		Quality System in Belgian, Brazilian, Czech, Turkish and Chinese plants 	
Product	Product	Product	Product
Belgium	Poland	Belgium	Poland
<b>ATG 04/1857</b>	<b>AT-15-2117/2001</b>	Turkey	Romania
<b>TS 10513</b>	<b>007-01/068-2003</b>	Germany	Slovak Republic
<b>Z-3.71-1745</b>	<b>1402A/02/0771/1/C/C04</b>	Czech Republic	
<b>C.070-021415</b>			

- Technical data:**  
For shotcrete, ... ask for specialized documentation

## Recommendations - mixing

### 1. General

- ✓ preferably use a central batching plant mixer
- ✓ recommended maximum dosage:

Max. aggregate size (mm)	Dosage (kg/m <sup>3</sup> )	
	pour	pump
8	110	80
16	70	55
32	60	45

- ✓ a continuous grading is preferred
- ✓ mix until all glued fibres are separated into individual fibres. Fibres don't increase mixing time significantly.
- ✓ if special cements or admixtures are used, a preliminary test is recommended

### 2. Fibre addition

Bags are non-degradable and may not be thrown into the concrete.



#### 2.1. In batching plant mixer

- ✓ never add fibres as first component in the mixer
- ✓ fibres can be introduced together with sand and aggregates, or can be added in freshly mixed concrete

#### 2.2. Truckmixer

- ✓ run mixer at drum speed: 12-18 rpm
- ✓ adjust slump to a min. of 12 cm (preferably with water reducing agents or high water reducing agents)
- ✓ add fibres with maximum speed of 60 kg/min
- ✓ optional equipment: belt-hoist elevator
- ✓ after adding the fibres, continue mixing at highest speed for 4-5 min. (± 70 rotations)

#### 2.3. Automatic dosing

- ✓ Fibres can be dosed from bulk at rates from 0 up to 3,5 kg/sec with a specially developed dosing equipment

## Recommendations - storage

<p>Protect the pallets against rain</p>	<p>Do not stack the pallets on top of each other</p>	<p>Delivered in non water-soluble bags of 20 kg on pallet 1200 kg big bag 1100 kg</p>
---	--	---

N.V. Bekaert S.A. - Bekaertstraat 2 - 8550 Zwevegem - Belgium  
 Tel. +32 (0) 56 / 76 69 86 - Fax +32 (0) 56 / 76 79 47  
 Internet: <http://www.bekaert.com/building>

Values are indicative only. Modifications reserved. All details describe our products in general form only. For ordering and design only use official specifications and documents. N.V. Bekaert S.A. 2005