



อิทธิพลของของวัสดุปอซโซลานโดยระบบสามประสานต่อกำลังและความต้านทาน  
คลอไรด์ของคอนกรีต

Influence of Pozzolanic Materials by Ternary Blend Systems on Strength  
And Chloride Resistance of Concrete

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรพันธ์ แสงสุวรรณและคณะ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายจ่ายประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2557  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

# รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

อิทธิพลของของวัสดุปอซโซลานโดยระบบสามประสานต่อกำลังและความต้านทาน  
คลอไรด์ของคอนกรีต

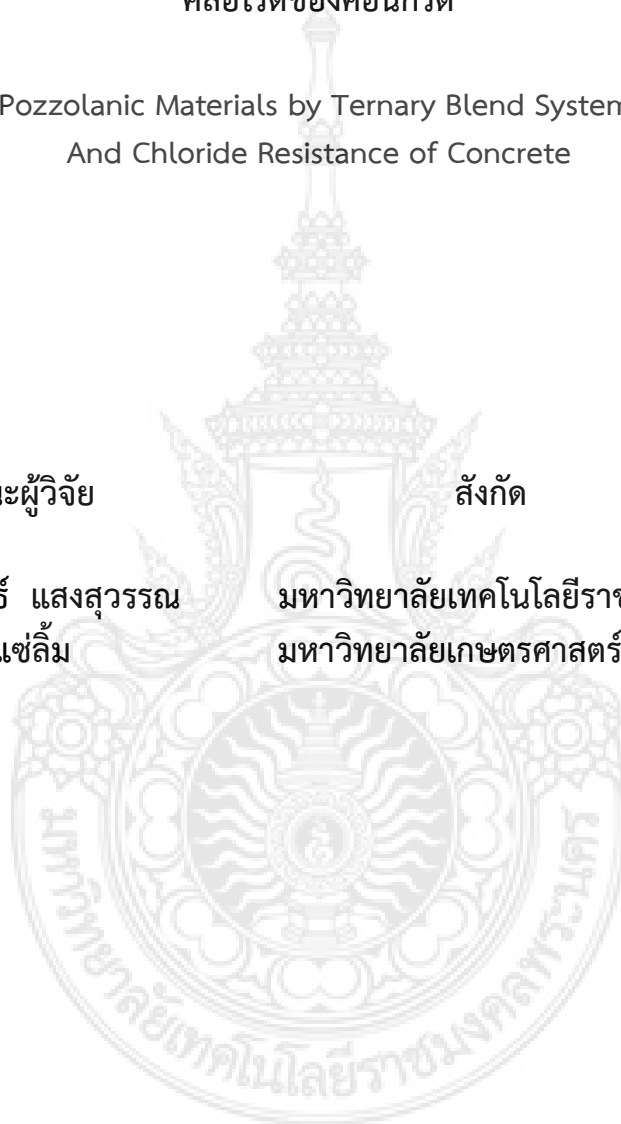
Influence of Pozzolanic Materials by Ternary Blend Systems on Strength  
And Chloride Resistance of Concrete

คณะผู้วิจัย

สังกัด

ผศ.จักรพันธ์ แสงสุวรรณ  
นายวิศิษ แซ่ลิ้ม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน





อิทธิพลของของวัสดุปอซโซลานโดยระบบสามประสานต่อกำลังและความต้านทาน  
คลอไรด์ของคอนกรีต

Influence of Pozzolan Materials by Ternary Blend Systems on Strength  
And Chloride Resistance of Concrete

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรพันธ์ แสงสุวรรณและคณะ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายจ่ายประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2557  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

อิทธิพลของคุณสมบัติเชิงกลของใยสังเคราะห์ต่อคานปอซโซลานคอนกรีต  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรพันธ์ แสงสุวรรณและคณะ  
งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายจ่ายประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2557

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุพอลิโพรพิลีนในระบบสามประสานโดยประกอบไปด้วย ใก้าลอย ดินขาว และ ผงซิลิกา โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนต่อกำลังและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต โดยพิจารณากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 240 - 350 กกต่อ ตร.ซม. โดยผันแปรอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) มี 3 ค่า คือ 0.4 ,0.45 และ 0.50 และผันแปรปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยระบบสามประสานของใก้าลอย ดินขาว และผง ซิลิกา ที่ร้อยละ 0, 2.5, 5, 10, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ และตัวอย่างควบคุม (w/b) ไม่มีส่วนผสมของใก้าลอย ดินขาว และผงซิลิกา ค่าการยุบตัวให้อยู่ใน ช่วง 3-5 ซม. และใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีต โดยหล่อเป็นตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10x20 เซนติเมตร ตัวอย่างแบบทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร และตัวอย่างแบบคานขนาด 10x10x35 เซนติเมตร หลังจากนั้นบ่มคอนกรีตในน้ำ 28 วัน และนำตัวอย่างคอนกรีตไปทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงดัด และนำไปทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านตัวอย่างคอนกรีตทุกส่วนผสมด้วยวิธี Chloride Migration Test และจากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุพอลิโพรพิลีนเช่น ผงซิลิกา ดินขาว และใก้าลอย ด้วยปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้นจะช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้มีคุณสมบัติทางกายภาพ ของกำลังรับแรงอัด แรงดึงเพิ่มขึ้นตามร้อยละที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ของ ใก้าลอย ดินขาว และผงซิลิกา ช่วยลดการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตได้ดีตามลำดับ ซึ่งเป็นผลจากความพรุนในคอนกรีตมีปริมาณที่ลดลงทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้น



## Abstract

This objective research to study the possibility of used pozzolan material in the ternary blend by fly ash, metakaolin and silica powder by replacement cement partially on the strength and resistance to chloride migration. Consideration of concrete with compressive strength in the range of 240-350 kg per sq. cm by varying the ratio of water/binder (w/b) there are three values are 0.4, 0.45 and 0.50, and variable amounts of replacement cement some. The ternary blend of the fly ash, metakaolin and silica powder of percentage of 0, 2.5, 5, 10, 15, 20 and 25 by weight of cement. and the control specimens (w/b) without contain fly ash, kaolin and silica powder, the slump test in the range of 3-5 cm, and the use superplasticizer to control the slump test of concrete. By casting specimens of cylindrical diameter 10x20 cm cube 10x10x10 cm and the beam size 10x10x35 cm, after curing 28 days, and test compressive, tensile and flexural strength of concrete, all specimens each ingredient by Chloride Migration Test method and the results showed that concrete is a mixture with pozzolan, such as silica powder, metakaolin and fly ash, with amount increase replacement. The increase will help improve the quality of the concrete physical properties. The increased of compressive and Tension strength as the percentage increase, especially to replacement cement increased by fly ash, metakaolin and silica powder reduces the penetration of chloride in concrete respectively, As a result of the porosity of the concrete with lower amounts of tightness concrete has increased.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่ริเริ่มและนำเสนอแนวคิดการนำวัสดุพอลิไซลิกที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งและสิ่งเคราะห์นำมาใช้เป็นส่วนผสมแทนที่ซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีต เพื่อลดพลังงานและมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมในการผลิตซีเมนต์ ทั้งยังเป็นต้นแบบของงานวิจัยและพัฒนาให้บรรลุไปได้ด้วยดี และต้องขอขอบคุณคณะผู้ร่วมวิจัยและผู้ช่วยนักวิจัยทุกท่าน ที่ได้ให้ความร่วมมือในการทำวิจัยในครั้งนี้ให้ผ่านไปได้ด้วยดี รวมทั้งเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่สละเวลาในการประสานงานและติดต่อกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ ที่ได้ให้ความกรุณาอนุเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้วิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรคณะวิศวกรรมศาสตร์และคณะวิทยาศาสตร์เคมีโดยเฉพาะ ดร.วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ หัวหน้าภาควิชาวิทยาศาสตร์เคมี อาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์เคมีทุกท่าน และเจ้าหน้าที่คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษา และให้ความอนุเคราะห์ในด้านการใช้ห้องทดลองปฏิบัติการทางเคมี รวมถึงขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

นายจักรพันธ์ แสงสุวรรณและคณะ  
ตุลาคม 2558



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญ (ต่อ)	จ
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญภาพ (ต่อ)	ช
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ของการศึกษา	3
บทที่ 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 วัสดุพอลิไซลัน	4
2.2 คอนกรีต	12
2.3 การกักความร้อนและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต	14
2.4 การกักความร้อนเนื่องจากคลอไรด์	16
2.5 ผลกระทบของคลอไรด์ในคอนกรีต	17
2.6 การแพร่ในคอนกรีต	18
2.7 คุณสมบัติการจับยึดคลอไรด์ของเถ้าลอยในคอนกรีต	20
2.8 การลดปริมาณคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี	22
บทที่ 3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ	26
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	26

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.3 สัดส่วนผสมคอนกรีตและสัญลักษณ์	27
3.4 วิธีการทดสอบ	27
3.5 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	29
3.6 วิธีการทดสอบ	31
บทที่ 4. วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดสอบ	
4.1 การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)	37
4.2 การทดสอบกำลังดึง (Splitting Tensile Strength)	40
4.3 การทดสอบการรับแรงดัด (Flexural Strength)	43
4.4 การซึมผ่านของสารละลายในปอซโซลานคอนกรีต	46
บทที่ 5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพของปอซโซลานคอนกรีต ระบบสามประสาน	48
5.1.1 การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)	48
5.1.2 การทดสอบกำลังดึง (Splitting Tensile Strength)	48
5.1.3 การทดสอบการรับแรงดัด (Flexural Strength)	49
5.2 การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในปอซโซลานคอนกรีต ระบบสามประสาน	50
5.3 ข้อเสนอแนะ	51
บรรณานุกรม	52
ภาคผนวก ก. วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	54
ภาคผนวก ข. การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ การหาปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย และการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ (Chloride Migration Test)	58
ภาคผนวก ค	61



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 39	13
ภาพที่ 2.2 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึง(Splitting tensile Strength)ASTM C 496	13
ภาพที่ 2.3 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 78	14
ภาพที่ 2.4 เซลล์ไฟฟ้าเคมีของการเกิดการกัดกร่อนในเหล็ก	15
ภาพที่ 2.5 ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนบนผิวเหล็กเสริม	15
ภาพที่ 2.6 ปริมาตรสัมพัทธ์ของเหล็กและผลิตภัณฑ์ของการสนิม	16
ภาพที่ 2.7 ความเสียหายเนื่องจากคลอไรด์โดยเหล็กเป็นสนิมต้นคอนกรีต	17
ภาพที่ 2.8 เหล็กถูกปกป้องจาก Passive layer จากการเกิดสนิม	18
ภาพที่ 2.9 การเข้าทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมของคลอไรด์	18
ภาพที่ 2.10 เส้นทางการแพร่ในคอนกรีต	20
ภาพที่ 2.11 รูปแบบของคลอไรด์ที่แตกต่างกันของคอนกรีต	21
ภาพที่ 2.12 แสดงขบวนการของวิธี Electrochemical Chloride Removal (ECR)	23
ภาพที่ 2.13 แสดงการทดสอบ Chloride Migration Test	23
ภาพที่ 2.14 แสดงอิทธิพลของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ Chloride Migration Test	24
ภาพที่ 2.15 ปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในคอนกรีตก่อนและหลังขบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการเปลี่ยนสารละลายใหม่และไม่เปลี่ยนสารละลาย	25
ภาพที่ 3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานของคอนกรีต ASTM C 39	31
ภาพที่ 3.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C78-94	32
ภาพที่ 3.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตตามมาตรฐานของ ASTM C 496	32
ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างการเตรียมก่อนคอนกรีตเข้าเครื่องทดสอบ	33
ภาพที่ 3.5 การทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้า Chloride Migration Test	33
ภาพที่ 3.6 การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์, การปรับ สภาพความเป็นกรดต่างค่า (pH) และการทำ Blank	34
ภาพที่ 3.7 แสดงตัวอย่างหลังการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย	35
ภาพที่ 3.8 ตัวอย่างการกรองผงคอนกรีตด้วยเครื่องดูดสุญญากาศและการเตรียมตัวอย่าง เพื่อทำการไทเทรต (Titration) หาปริมาณคลอไรด์อิสระ	36
ภาพที่ 3.9 การกระตุ้นการทำงานของ Chloride ISE ด้วยสารละลายคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร และการหาปริมาณคลอไรด์อิสระด้วยเครื่อง Chloride Analyzer	36
ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีต ที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่ w/c =0.40, 0.45 และ 0.50	38
ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีต ที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่ w/c =0.40	39

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีต ที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่ $w/c = 0.45$	39
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีต ที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่ $w/c = 0.50$	40
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีต ที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่ $w/c = 0.40, 0.45$ และ $0.50$	41
ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีต ที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่ $w/c = 0.40$	42
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีต ที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่ $w/c = 0.45$	42
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีต ที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่ $w/c = 0.50$	43
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีต ที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่ $w/c = 0.40, 0.45$ และ $0.50$	44
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีต ที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่ $w/c = 0.40$	45
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีต ที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่ $w/c = 0.45$	45
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีต ที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่ $w/c = 0.50$	46
ภาพที่ 4.13 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ของตัวอย่างคอนกรีตในการทดสอบ Chloride Migration Test	47

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมี ของ Silica powder	12
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม (สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง)	28
ตารางที่ 3.2 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (ปริมาณน้ำหนัก กก. ต่อลูกบาศก์เมตร)	28
ตารางที่ 3.3 แสดงจำนวนตัวอย่างและการทดสอบ	29
ตารางที่ 4.1 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสม เถ้าลอย ดินขาวและผงซิลิกา	37
ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตผสม เถ้าลอย ดินขาวและผงซิลิกา	40
ตารางที่ 4.3 ค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตผสม เถ้าลอย ดินขาวและผงซิลิกา	43
ตารางที่ 4.4 ปริมาณคลอไรด์ในสารละลายในปอซโซลานคอนกรีตด้วยวิธี (Chloride Migration Test)	46



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตจนถึงปัจจุบันโครงสร้างโดยทั่วไปส่วนมากเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กเพราะผู้ออกแบบโครงสร้างมีความเข้าใจว่าจะมีอายุการใช้งานได้นานหากอยู่ในสภาวะปกติ ในความเป็นจริงการออกแบบโดยส่วนมากจะไม่คำนึงถึงความต้านทานทางด้านความคงทนของคอนกรีต เช่นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องสัมผัสกับน้ำทะเล น้ำกร่อยหรือก่อสร้างอยู่บริเวณชายฝั่งทะเลรวมทั้งโครงสร้างใต้ดินบริเวณนั้นจะเกิดความเสียหายจากสภาพแวดล้อม ซึ่งจะมีผลทำให้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตถูกทำลายและการรับกำลังจะลดลงอย่างต่อเนื่อง จึงเป็นประเด็นปัญหาที่ต้องให้ความสำคัญในการแก้ปัญหาเบื้องต้นในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเป็นการช่วยยืดอายุให้โครงสร้างสามารถใช้งานได้ต่อไปอีก

โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตมีความสามารถในการป้องกันการเกิดสนิมที่เหล็กเสริมได้เป็นอย่างดีด้วยเหตุผลที่ว่าในคอนกรีตมีความเป็นด่าง (alkaline) ซึ่งทำให้เกิดเป็นชั้นฟิล์มอยู่บริเวณพื้นผิวของเหล็กเสริมช่วยป้องกันการเกิดสนิมให้เกิดขึ้นช้าลง แต่อย่างไรก็ดีการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตอาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากคุณภาพของตัวคอนกรีตเอง เช่น การปนเปื้อนของคลอไรด์ที่มีอยู่ในวัสดุดิบที่ใช้ผสมคอนกรีตและคอนกรีตมีความพรุน (porosity) จำนวนมากเป็นต้นหรือโครงสร้างคอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์รุนแรงซึ่งเอื้อต่อการแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีต ทั้งนี้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีสาเหตุ เนื่องจากปริมาณของคลอไรด์ที่แพร่เข้าไปสะสมอยู่ที่บริเวณเหล็กเสริมมีค่ามากเพียงพอที่จะทำให้ฟิล์มที่ช่วยป้องกันผิวเหล็กเสริมถูกทำลายและเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process) ขึ้น ส่งผลให้เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีต กับเหล็กเสริม การที่มีปริมาณคลอไรด์จำนวนมากพอที่จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมโดยทั่วไปเรียกว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤต และนอกจากนี้ยังทำให้ชิ้นส่วนของโครงสร้างเกิดการแตกร้าวเพิ่มมากขึ้น จากการที่เหล็กเสริมเกิดสนิมเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพและอายุการใช้งานลดน้อยลง

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นพบว่าการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตเป็นสาเหตุหลักๆของการเกิดสนิม ที่เหล็กเสริมในคอนกรีต อย่างไรก็ตามคอนกรีตโครงสร้างในปัจจุบันได้มีการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยการนำวัสดุปอซโซลานที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานเข้ามาใช้กับงานคอนกรีตอย่างแพร่หลายและมีบทบาทในงานคอนกรีตมากขึ้น ซึ่งวัสดุปอซโซลานมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทั้งยังเป็นการนำเอาวัสดุเหลือทิ้ง (by product) นำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้งเป็นการช่วยลดภาวะโลกร้อนได้อีกทางหนึ่ง การใช้สารผสมเพิ่มชนิดปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย (Fly Ash) และดินขาวเผา (Meta kaolin) เมื่อนำมาผสมคอนกรีตในปริมาณที่เหมาะสมจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้ได้สารประกอบซิลิเกตไฮเดรตและซิลิเกตอลูมิเนียมไฮเดรตในเนื้อคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีโครงสร้างภายในที่แน่นขึ้นและมีกำลังสูงขึ้น

ในประเทศไทยมีแหล่งของเถ้าลอยที่ได้จากโรงงานผลิตไฟฟ้าและแหล่งของดินขาวธรรมชาติหลายแหล่งในภาคอุตสาหกรรมเซรามิก และในการศึกษาครั้งนี้จะรวมไปถึงการนำเอา Silica Powder มาเป็นส่วนผสมเนื่องจาก Silica Powder นั้นยังไม่เป็นที่นิยมเท่าไรนัก การศึกษาครั้งนี้ อาจเป็นตัวแปรที่ทำให้มีการต่อยอด และก่อให้เกิดการพัฒนาของคอนกรีตก็เป็นได้ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งศึกษาถึงผลกระทบของสัดส่วนการผสม ในการต้านทานคลอไรด์ในคอนกรีตโดยใช้วัสดุปอซโซลานของเถ้าลอย (Fly Ash) และ ดินขาว (Meta kaolin) ซึ่งจะนำเอามาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในระบบสามประสานเพื่อทดแทนปริมาณการใช้ ปูนซีเมนต์ให้ลดน้อยลง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของการใช้วัสดุปอซโซลานคอนกรีตในระบบสามประสานของเถ้าลอย และ ดินขาว แทนที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์บางส่วนที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านการพัฒนากำลังอัด กำลังดัด และหาผลของค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของระบบสามประสาน

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของสัดส่วนการผสมในการต้านทานคลอไรด์ในคอนกรีตโดยใช้วัสดุปอซโซลานของเถ้าลอย Fly Ash และดินขาว (Meta kaolin)

1.2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุประสานในระบบสามประสานที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

1.2.4 เพื่อศึกษาผลกระทบของวัสดุประสานที่ใช้กับปอซโซลานคอนกรีตในการซึมผ่านของสารละลายในปอซโซลานคอนกรีตด้วยการทดสอบ Chloride Migration Test

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของ การใช้วัสดุปอซโซลานในระบบสามประสานโดยประกอบไปด้วย เถ้าลอย ดินขาว และSilica Powder โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนต่อกำลังและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 240 - 350 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นต์เมตรโดยผันแปรอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) มี 3 ระดับคือ 0.4 ,0.45 และ0.50 และผันแปรปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมด้วยระบบสามประสานของเถ้าลอย ดินขาวและSilica Powder 6 ระดับคือร้อยละ 0, 2.5, 5, 10,15,20 และ 25 โดยน้ำหนักควบคุม (w/b) ให้เท่ากับคอนกรีตที่ไม่ผสม เถ้าลอย ดินขาว และSilica Powder ควบคุมค่าการยุบตัวให้อยู่ใน ช่วง 3-5 ซม. และใช้ปริมาณสาร ลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีต สำหรับการบ่มจะทำการบ่มในน้ำต่อเนื่องในห้องทดลองที่อายุของคอนกรีต 28 วัน แล้วจึงนำมาทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพเช่นการทดสอบกำลังดัดตามมาตรฐาน ASTM C78 ทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 39 และทดสอบกำลังดึงตามมาตรฐาน ASTM C 496 และการทดสอบการเคลื่อนที่ของ Chloride Migration Test

#### 1.4 ประโยชน์ของการศึกษา

การศึกษานี้เป็นประโยชน์และองค์ความรู้ในการศึกษาสำหรับการตัดสินใจที่จะนำเอาวัสดุประสานประเภทปอซโซลานมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตในลักษณะสามประสานเพื่อที่จะทราบถึงความคงทนและอายุการใช้งานเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป และนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ โดยการนำวัสดุเหลือทิ้ง นำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือในอีกมุมหนึ่งสามารถจะช่วยในการวางแผนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้คอนกรีตสามประสานในการก่อสร้างได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้การศึกษานี้สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลที่จำเป็นต่อไปเพื่อเป็นแนวทางในการผลิตคอนกรีตสามประสานตลอดจนการใช้เถ้าลอย (Fly ash) และดินขาว (Meta kaolin) ที่มีอยู่ในประเทศไทยให้เกิดประโยชน์สูงสุด



## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับเนื้อหาในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึงคอนกรีตปรกติ และคอนกรีตที่ใช้วัสดุปอซโซลาน แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนโดยเถ้าลอย ดินขาว และผงซิลิกา ด้วยระบบสามประสาน ลักษณะและพฤติกรรมของคอนกรีตมาตรฐานและตลอดจนงานวิจัยที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา

การป้องกันการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถกระทำได้ โดยการปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตและเหล็กเสริม การปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตอาจทำได้ โดยการใช้สารปอซโซลานที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนและสารเคมีผสมเพิ่ม การเกิดสนิมของเหล็กเสริม เนื่องจากการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตเป็นปัญหาของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ผลกระทบโดยรวมของการเกิดสนิมของเหล็ก คือ กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลงเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดเหล็กลดลง เกิดการแตกร้าวและ หลุดออกของคอนกรีตหุ้มภายนอก ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างมากยิ่งขึ้นและทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดลง

#### 2.1 วัสดุปอซโซลาน

ASTM C 618-94a ได้ให้คำจำกัดความของสารปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินา เป็นองค์ประกอบหลักและถ้าหากทำให้สารปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีปริมาณที่เพียงพอที่สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุดมภูมิปกติซึ่งขั้นตอนนี้เป็นการทำงานปฏิกิริยาขั้นที่ 2 ต่อจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ซึ่งจะส่งผลให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน อย่างไรก็ตามสำหรับวัสดุประสานที่ใช้ศึกษาวิจัยนี้เป็นวัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์ในวงการก่อสร้างในปัจจุบันและใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในประเทศและต่างประเทศได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) ดินขาว (Metakaolin) และผงซิลิกา

##### 2.1.1 วัสดุเถ้าลอย (Fly ash)

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอยได้จากการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้าถ่านหิน โดยเถ้าลอยจะถูกดักจับเก็บไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล เถ้าลอยมีสีเทา เทาดำหรือน้ำตาลมีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของซิลิกาและอลูมินาสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์กับน้ำได้สารประกอบที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) เป็นต้น

ได้มีการศึกษาคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงสำหรับใช้ในงานโครงสร้างครั้งแรก โดย The Canadian Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET) ในปลายทศวรรษ 1980s (Malhotra, 1986) คอนกรีตชนิดนี้มีส่วนผสมเถ้าลอยมากกว่าซีเมนต์โดยน้ำหนักและปกติจะผสมที่อัตราส่วน W/B ประมาณ 0.3 กำลังของคอนกรีตในระยะต้นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้และมีการพัฒนากำลัง

และโมดูลัสความยืดหยุ่นในระยะหลังมากขึ้น มีการหดตัวแห้ง (drying shrinkage) และการล้า (creep) ต่ำ และมความทนทานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ปกติ (Langley et al., 1989; Carette et al., 1993; Bilodeau et al., 1994; Bisailon et al., 1994) เชื่อกันว่าในการผสมเถ้าลอยมากกว่า 50% โดยน้ำหนัก เถ้าลอยจะมีส่วนสำคัญในการเชื่อมประสาน (Berry et al., 1994) เถ้าลอยเป็นที่รู้จักในฐานะวัสดุปอซโซลานมานานโดยตัวเถ้าลอยเองแล้วมีคุณสมบัติน้อยหรือไม่มีคุณสมบัติทางการเชื่อมประสาน (ASTM 618-94a, 1995) และไม่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้โดยตรง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการใช้เถ้าลอยในคอนกรีตในงานโครงสร้างมักนิยมใช้แทนที่ซีเมนต์ในช่วง 15% ถึง 25% (ACI Committee 211, 1993; Berry et al., 1994) แต่เมื่อมีการใช้เถ้าลอยปริมาณที่สูงจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในการพัฒนากำลังและปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยทั่วไปปริมาณเถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตสำหรับใช้ในงานโครงสร้างจะจำกัดประมาณ 20 ถึง 25% ของวัสดุประสาน (Zhang, 1995) มาตรฐานในหลายประเทศยังคงจำกัดปริมาณมากที่สุดของเถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตสำหรับงานโครงสร้างประมาณ 20 ถึง 25% ซึ่งในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงปฏิกิริยาปอซโซลานอาจจะยังคงเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์เนื่องจากปริมาณเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนสูงเมื่อเทียบกับซีเมนต์ ซึ่งเถ้าลอยบางส่วนอาจยังคงอยู่ในสภาพเดิมโดยไม่ทำปฏิกิริยาถึงแม้เป็นระยะหลังการบ่มเป็นเวลานาน (Zhang, 1995)

Feldman et al. (1990) พบว่าในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง เถ้าลอยจะเริ่มทำปฏิกิริยากับ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในช่วง 3 ถึง 7 วัน แต่ยังคงมีปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  และเถ้าลอยจำนวนมากที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาหลัง 91 วัน ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยาอยู่ในรูปของ calcium silicate hydrate (C-S-H) และมีอัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกา (c/s) ที่ต่ำ

Berry et al. (1990) ศึกษากลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันในเฟสที่ใช้เถ้าลอยปริมาณสูงแทนที่ซีเมนต์ โดยทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพด้านกำลังอัดของมอร์ต้า ทางรูปร่าง (morphology) โดยการใช้วิธี SEM ส่วนประกอบของส่วนของแข็ง (solid-phase) และระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยการใช้วิธี XRD และการวิเคราะห์ทางด้านอุณหภูมิจึง (thermal analysis) และส่วนประกอบของ pore fluid โดยวิธี high-pressure extraction พบว่าในระบบเถ้าลอยปริมาณสูง (high-volume fly ash system) ทั้งปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีมีผลกระทบร่วมกันต่อความแน่น (density) และแรงยึดเหนี่ยวในเฟส ในช่วงต้นผลกระทบทางด้านกายภาพโดยการอุดตันช่องว่างและทางเคมีโดยมีผลต่อการเกิด ettringite หรือการเกิด sulphoaluminate เป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนากำลัง ในระยะยาวปฏิกิริยาไฮเดรชันมีอิทธิพลจากการเกิด silica-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 พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงมีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติโดยโมดูลัสความยืดหยุ่นที่สูงของอนุภาคเถ้าลอยทำให้เพสต์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณสูงมีโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มากกว่าเพสต์ของคอนกรีตที่ไม่มีการผสมเถ้าลอยและอนุภาคของเถ้าลอยยังปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคในเพสต์ให้ดีขึ้นโดยอนุภาคของเถ้าลอยทำหน้าที่เป็นมวลรวมขนาดเล็ก (micro aggregate) 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 โดยสามารถใช้ร่วมกันได้โดยไม่เกิดผลเสียในคอนกรีต โดยเปอร์เซ็นต์การลดน้ำในคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีค่าความยุบตัวเท่ากันมีค่าไม่เกิน 15% ปรับปรุงคุณสมบัติทางด้าน การลดน้ำมากกว่าสารลดน้ำมาตรฐานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยให้เปอร์เซ็นต์การลดน้ำที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติที่มีความชื้นเหลวเท่ากันเนื่องจากในความชื้นเหลวเท่ากันคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีน้ำส่วนเกินที่น้อยกว่าดังนั้นการเติมสารลดน้ำเพื่อนำส่วนเกินนี้มาใช้จึงมีผลกระทบที่น้อยกว่า

ประจิต (2526) ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะผสมกับคอนกรีต และศึกษากำลังรับแรงอัดโดยใช้อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณ 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) พบว่ากำลังอัดระยะแรกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยเล็กน้อยมีค่าลดลงตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเวลาผ่านไปกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะดีขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและเสนอปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมในช่วง 0 ถึง 40% ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นชดเชยปฏิกิริยาของซีเมนต์ที่ถูกเถ้าลอยแทนที่ได้มีการศึกษาการใช้เถ้าลอยแม่เมาะเพื่อปรับปรุงความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสด และมี

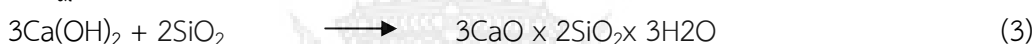
รายงานว่เมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะช่วยปรับปรุงความสามารถในการเทได้เพิ่มขึ้น แต่มีผลในการลดกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

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) ของซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์จากเถ้าลอยกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สารประกอบตัวใหม่ขึ้นที่มีคุณสมบัติคล้ายผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในรูปสมการเคมีได้ดังนี้

ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ



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



#### 2.1.1.1 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% แต่เมื่อมีการใช้เถ้าลอยปริมาณที่สูงจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในการพัฒนากำลังและปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยทั่วไปปริมาณเถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตสำหรับใช้ในงานโครงสร้างจะจำกัดประมาณ 20 ถึง 25% ของวัสดุประสาน (Zhang, 1995) มาตรฐานในหลายประเทศยังคงจำกัดปริมาณมากที่สุดของเถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตสำหรับงานโครงสร้างประมาณ 20 ถึง 25% ซึ่งในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงปฏิกิริยาปอซโซลานอาจจะยังคงเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์เนื่องจากปริมาณเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนสูงเมื่อเทียบกับซีเมนต์ซึ่งเถ้าลอยบางส่วนอาจยังคงอยู่ในสภาพเดิมโดยไม่ทำปฏิกิริยาถึงแม้เป็นระยะหลังการบ่มเป็นเวลานาน

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

#### 2.1.1.2 ผลกระทบของปริมาณเถ้าลอยการแทนที่ซีเมนต์ต่อกำลังของคอนกรีต

พบว่ากำลังอัดระยะแรกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยเล็กน้อยมีค่าลดลงตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเวลาบ่มมากขึ้นกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะดีขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและเสนอปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมในช่วง 0 ถึง 40% ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นชดเชยปฏิกิริยาของซีเมนต์ที่ถูกเถ้าลอยแทนที่ได้

#### 2.1.1.3 อิทธิพลของเถ้าลอยต่อกำลังอัด

การใช้คอนกรีตผสมเถ้าลอยในระยะเริ่มแรก จะใช้วิธีการเติมเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์เพื่อการประหยัดซีเมนต์ ทำให้ราคาคอนกรีตต่อหน่วยลดลง แต่การใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์โดยปริมาตรจะทำให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำกว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์โดยน้ำหนัก Gopalan และ Haque (1983) พบว่าการผสมเถ้าลอยต่อซีเมนต์โดยปริมาตรจะให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์โดยน้ำหนักเป็นที่ยอมรับมากกว่าเพราะง่ายและสะดวกในทางปฏิบัติ แต่จะให้กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาในระยะเริ่มแรก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์และคุณภาพของเถ้าลอย Gopalan และ Haque (1983) พบว่าปริมาณเถ้าลอยสูงสุดที่ใช้แทนปูนซีเมนต์ควรอยู่ระหว่าง 25 – 30% โดยน้ำหนัก และถ้าเถ้าลอยมีคุณภาพดีอาจใช้แทนที่ซีเมนต์ได้ถึง 30 – 40% โดยน้ำหนักและเถ้าลอยที่ผ่านการอบด้วยไอน้ำจะสามารถใช้แทนที่ซีเมนต์ได้สูงถึง 45% โดยน้ำหนัก การที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีกำลังอัดในช่วงอายุต้น ๆ ต่ำ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นน้อยไม่เพียงพอที่จะชดเชยกำลังส่วนที่ลดลง เนื่องจากส่วนผสมมีปริมาณซีเมนต์ลดน้อยลง แต่เมื่ออายุมากขึ้นการเพิ่มกำลังอัดมีค่ามากขึ้นและอาจสูงกว่าคอนกรีต

#### 2.1.2 วัสดุดินขาว (Meta kaolin)

ดินขาว ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) จัดเป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้จากการนำเอาดินขาวดิบจากธรรมชาติ ( $Al_2SiO_5(OH)_4$ ) มาปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน โดยวิธีการเผาในช่วงเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมซึ่งโดยทั่วไปมีผลึกเป็นลักษณะเป็นอัยรูป (Amorphous) ไม่มีรูปร่างที่แน่นอนมีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือชมพูขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุหลักของดินขาวประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ ( $SiO_2$ ) และอลูมินาออกไซด์

(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักและรองลงมาเป็นเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น โดยองค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีปริมาณที่แตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดของดิน อนุภาคของดินขาวโดยเฉลี่ยมีขนาดประมาณ 1.5 ไมครอน (Balaguru,2001) ตามมาตรฐาน ASTM C168 ดินขาวเป็นสารปอซโซลาน Class N (Raw or Calcined Pozzolan) เมื่อผสมในคอนกรีตดินขาวจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)<sub>2</sub> ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานและให้กำลังแก่คอนกรีต นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นเพิ่มขึ้น (Wild,1996) นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (Wild, 1996 ; จีรวัดน์,2546)

สำหรับในประเทศไทยมีรายงานในการศึกษาถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาดินขาวดิบ โดยอนุพงษ์ (2543) ศึกษาศักยภาพและเงื่อนไขที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินขาวดิบในประเทศไทยจาก 3 แหล่ง ได้แก่ แหล่งปราจีนบุรี ระนอง และ ลำปาง โดยนำ ดินขาวดิบมาเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 700, 800, 900 และ 1,000 องศาเซลเซียส และแปรผันเวลาในการเผา คือ 4, 6 และ 8 ชั่วโมง จากการทดลองเมื่อพิจารณาจากค่าดัชนีกำลัง (Strength Activity Index) ของมอร์ต้าผสมดินขาวที่ได้จากการเผา พบว่าวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับดินขาวดิบทั้ง 3 แหล่งคือเผาด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง โดยมอร์ต้าที่ผสมดินขาวจากแหล่งจังหวัดปราจีนบุรี ให้ค่าดัชนีกำลังสูงที่สุดร้อยละ 131 เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าที่ผสมดินขาวจากแหล่งจังหวัดระนองและลำปางที่ให้ค่าดัชนีกำลังร้อยละ 115 และ 100 ตามลำดับ

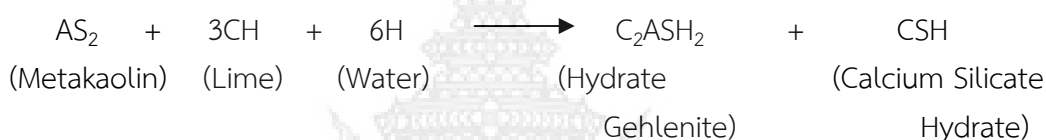
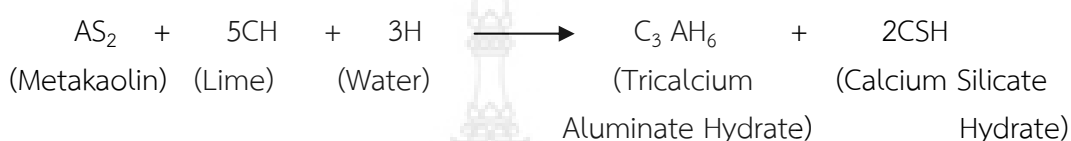
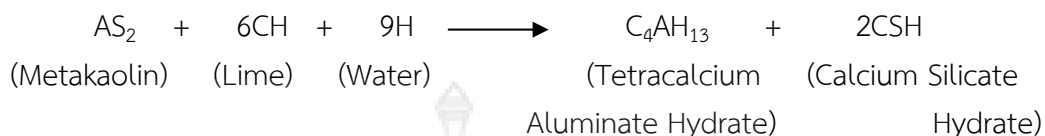
นอกจากนี้ Hengsadeekul (1995) ได้ศึกษาดินขาวดิบจากแหล่งจังหวัดลำปาง โดยนำดินขาวดิบที่ผ่านการล้าง (Washed Kaolin) และดินขาวดิบที่ผ่านการบด (Crushed Kaolin) มาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส พบว่ากำลังต้านทานแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้าผสมดินขาวที่ได้จากการเผาดินขาวดิบที่ผ่านการล้างมีค่าสูงกว่าดินขาวดิบบดร้อยละ 6.4 และได้ทำการทดลองหาอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมโดยแปรผันอุณหภูมิที่ 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผา คือ 800 องศาเซลเซียส

#### 2.1.2.1 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ปฏิกิริยาปอซโซลานิก เป็นปฏิกิริยาขั้นที่ 2 เกิดจากการทำ ปฏิกิริยาของซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ที่เป็นสารประกอบหลักในดินขาวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตในเนื้อคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้ (Mindess, 1981)



Murat (1983) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินขาว โดยผสมดินขาวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส กับน้ำและคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสพบว่าเกิดสารประกอบ  $C_4AH_{13}$ ,  $C_3AH_6$ ,  $C_2ASH_2$  และ  $CSH$  ซึ่งชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารตั้งต้นโดยสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้



ผลของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้คัลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ( $CSH$ ,  $CAH$ ) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติต้านกำลัง การซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และ ความทนทาน เป็นต้น

มีรายงานการศึกษาพบว่าปริมาณดินขาวที่ใช้เพื่อทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้งหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 15-20 โดยปริมาณที่ใช้จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของดินขาว, พื้นที่ผิวจำเพาะของดินขาวและปริมาณของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Oriol and Pera, 1995; Wild and Khatib, 1997; Kostuch et al., 1993) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และดินขาวในปริมาณร้อยละ 30 – 40 สามารถทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้งหมดภายในเวลา 28 วัน (Oriol and Pera, 1995)

ผลการศึกษาของ Wild et al. (1997) พบว่าเมื่อพื้นที่ผิวจำเพาะของดินขาวเพิ่มขึ้นจาก 12,000 ตารางเมตรต่อกิโลกรัมเป็น 15,000 ตารางเมตรต่อกิโลกรัมจะช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกโดยค่ากำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่เพิ่มสูงขึ้นไม่มีผลต่อกำลังอัดในระยะยาว (90 วัน)

### 2.1.2.2 ผลกระทบของดินขาวต่อกำลังของคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวจะให้ค่ากำลังอัดที่ระดับหนึ่ง แต่เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานาร่วมผสมในคอนกรีตทั้งโดยวิธีการแทนที่ปูนซีเมนต์ (Replacement Method) หรือวิธีผสมเพิ่มเข้าไปในส่วนผสมของคอนกรีต (Addition Method) ในสัดส่วนที่เหมาะสมจะทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้น ความแตกต่างของกำลังที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารปอซโซลานานั้นๆ (ธีรราช และชัย, 2543)

Wild et al. (1996) ศึกษาผลกระทบของดินขาวต่อการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตโดยแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวในปริมาณร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนักและทำการบ่มในช่วงอายุ 1 - 90 วัน คอนกรีตที่ผสมดินขาวมีกำลังต้านทานแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมในทุกปริมาณของการแทนที่และทุกช่วงอายุของการบ่มโดยปริมาณของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวที่เหมาะสมที่สุด คือร้อยละ 20 และสรุปว่าการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวเกิดจากผลของ Microfiller Effect ซึ่งจะเกิดขึ้นทันทีหลังจากผสมดินขาวลงในคอนกรีตและผลของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นชัดเจนที่สุดในช่วง 7 - 14 วันแรก นอกจากนี้ดินขาวยังมีส่วนช่วยในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตในช่วง 24 ชั่วโมงแรกหลังจากการผสม

Curcio et al. (1998) ทำการศึกษาค่ากำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาว โดยเปรียบเทียบกับมอร์ต้าผสมซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) ในปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ที่เท่ากัน และพบว่ามอร์ต้าผสมดินขาวให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงกว่ามอร์ต้าผสมซิลิกาฟุ้งโดยสังเกตได้อย่างชัดเจนในช่วง 28 วันแรก แต่ในระยะยาว (90 - 180 วัน) ค่ากำลังอัดจะมีความแตกต่างกันน้อยมากและจากการวิเคราะห์ Differential Thermal Analysis (DTA) หาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์พบว่าดินขาวที่ใช้การทดลองมีความไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกใกล้เคียงกับซิลิกาฟุ้ง

Balaguru (2001) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลและการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ของคอนกรีตปกติ และคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมดินขาว จากการทดลองพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวในช่วงอายุเริ่มต้นจะช้า แต่ในระยะยาวการพัฒนากำลังอัดจะเพิ่มสูงขึ้นโดยคอนกรีตที่ผสมดินขาวจะให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นกว่าร้อยละ 25 นอกจากนี้คอนกรีตผสมดินขาวที่บ่มในอุณหภูมิสูงจะให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดในช่วงต้นเร็วขึ้น แต่ในระยะยาวอุณหภูมิไม่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัด

Sayamipuk (2000) ได้ศึกษาดินขาวจากแหล่งจังหวัดระนองในประเทศไทย โดยนำดินขาวดิบมาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากการทดลองมอร์ต้าผสมดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน พบว่าการแทนที่ซีเมนต์โดยดินขาวในอัตราส่วนร้อยละ 30 จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด ทั้งนี้ นอกจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นอนุภาคของดินขาวยังมีส่วนช่วยในการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้า เนื่องจากผลของ Microfiller Effect และจากการทดลองเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวในปริมาณที่เท่ากันโดยมีอัตราส่วนผสมของน้ำต่อวัสดุประสานต่างกันคือ 0.40 และ 0.50 พบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ต้าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 จะสูงกว่า 0.50 เนื่องจากอนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างในเนื้อมอร์ต้าและช่วยปรับปรุงในส่วนของ Interfacial Zone นอกจากนี้ยังพบว่าค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน ของมอร์ต้าผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และแทนที่ซีเมนต์โดยดินขาวในอัตราส่วนร้อยละ 30 มีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าควบคุมที่อายุการบ่ม 90 วัน ค่าการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้สามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลจากดินขาวช่วยในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ในช่วงอายุเริ่มต้นซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาอื่น (Wild et al., 1996)

### 2.1.3 Silica powder

Silica powder ก็คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide) หรือที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า ซิลิกา (จากภาษาละตินคำว่า silex) คือสารประกอบระหว่างออกไซด์และซิลิกอนรวมตัวกันเป็นสูตรทางเคมีคือ  $\text{SiO}_2$  และเป็นที่ยอมรับกันตั้งแต่สมัยโบราณถึงความแข็งแรงของมัน ซิลิกามักพบได้ทั่วไปในธรรมชาติอาจในรูปของทรายหรือควอตซ์ และในผนังเซลล์ของไดอะตอม ซิลิกาเป็นสารประกอบ ที่มีจำนวนมากโดยทั่วไปบนเปลือกโลก

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมี ของ Silica powder

รายการ	เปอร์เซ็นต์(%)									
	$\text{SiO}_2$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	PH	density	Hardness
Silica powder	99.72	0.0049	0.004	0.0033	0.0094	0.010	0.0737	7	2.65	7

## 2.2 คอนกรีต (Concrete)

คอนกรีตคือวัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันนี้ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติหลายประการที่เหมาะสมเช่นสามารถหล่อขึ้นรูปได้ตามต้องการมีความคงทนสูงตกแตงผิวให้สวยงามได้และที่สำคัญคือมีราคาถูกโดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับราคาเหล็ก รูปพรรณโดยทั่วไปคอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสมพื้นฐาน 2 ส่วนคือส่วนแรกจะเรียกว่าซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) ได้แก่ปูนซีเมนต์น้ำและสารผสมเพิ่มส่วนที่สองประกอบไปด้วยมวลรวม (Aggregates) ได้แก่มวลรวมละเอียดหรือทรายและมวลรวมหยาบหรือหินหรือกรวดโดยเมื่อนำส่วนผสมต่างๆเหล่านี้มาผสมกันจะได้คอนกรีตที่คงสภาพเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่งพอที่จะนำไปเทลงแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการได้โดยเรียกคอนกรีตในสภาพนี้ว่า “คอนกรีตสด (Fresh Concrete)” หลังจากนั้นคอนกรีตจะเปลี่ยนสภาพไปเป็นของแข็งในเวลาต่อมาโดยจะมีความแข็งแรงมากขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้นคุณสมบัติของคอนกรีตแข็งตัวผ่านข้อกำหนดด้านการรับแรงตามที่ออกแบบไว้แล้วจึงสามารถเปิดใช้งานรับน้ำหนักได้ต่อไปซึ่งเราจะเรียกคอนกรีตสภาพที่เป็นของแข็งแล้วนี้ว่า “คอนกรีตแข็งตัวแล้ว(Hardened Concrete)” คุณสมบัติของคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ คุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพซึ่งคุณสมบัติทั้งสองจะมีความสำคัญไปตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตนั้นอย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งสองลักษณะจะมีผลต่อกันและกันการทำให้คอนกรีตแข็งตัวแล้วมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นจะต้องมาจากการเลือกใช้วัสดุและส่วนผสมคอนกรีตตลอดจนการทำคอนกรีตที่ดีทุกขั้นตอนเพื่อให้ได้คอนกรีตมีคุณสมบัติตรงตามที่ต้องการ

### 2.2.1 คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต (Mechanical Properties of Concrete)

กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหมายถึงความต้านทานต่อหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นโดยไม่เกิดรอยแตกร้าวและการพังทลายโดยกำลังอัดของ

คอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการได้แก่กำลังของมอร์ตาร์ กำลังของมวลรวมหยาบและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ตาร์กับมวลรวมหยาบ

กำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) คอนกรีตจัดเป็นวัสดุเปราะคือมีกำลังรับแรงอัดสูงและกำลังรับแรงดึงต่ำประมาณร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 15 ของกำลังรับแรงอัดกำลังรับแรงดึงหมายถึงความต้านทานในการรับแรงดึงของคอนกรีตถึงแม้ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคอนกรีตจะไม่ได้รับแรงดึงก็ตามแต่การทราบค่ากำลังดึงนี้จะช่วยในการควบคุมการแตกร้าวของคอนกรีตจากผลกระทบต่างๆเช่น อุณหภูมิการหดตัวและมีประโยชน์อย่างมากในงานคอนกรีตอัดแรงเป็นต้น

กำลังเฉือน (Shear Strength) การเฉือนเป็นการกระทำของแรงสองแรงซึ่งมีขนาดเท่ากันและขนานกันโดยกระทำตรงข้ามบนระนาบซึ่งมีระยะห่างกันเล็กน้อยแรงเฉือนมักจะเกิดขึ้นพร้อมกับแรงดึงและแรงดัดเสมอการทดสอบความต้านทานแรงเฉือนในคอนกรีตโดยตรงนี้ไม่สะดวกเช่นเดียวกับการทดสอบการหาความต้านทานแรงดึงทั้งนี้เพราะค่าแรงดัดแรงกดและแรงดึงในแนวทแยงจะมีส่วนเกี่ยวข้องทำให้ผลการทดสอบไม่ถูกต้องปกติการทดสอบหาความต้านทานแรงเฉือนกระทำได้โดยการบิดแท่งตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกพบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนมีค่าประมาณร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 25 ของกำลังรับแรงอัดค่าความต้านทานแรงเฉือนนี้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของคอนกรีตเช่นเดียวกับค่ากำลังอัดประลัย

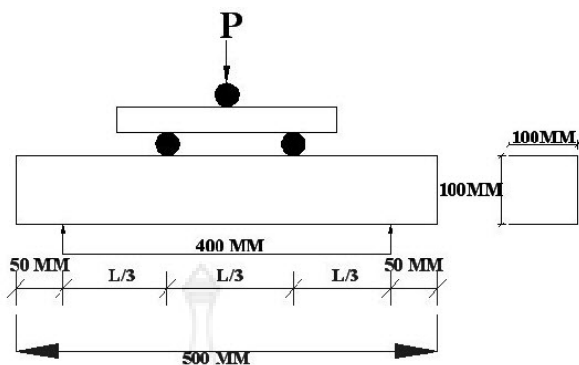


ภาพที่ 2.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 39



ภาพที่ 2.2 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึง (Splitting tensile Strength) ASTM C 496



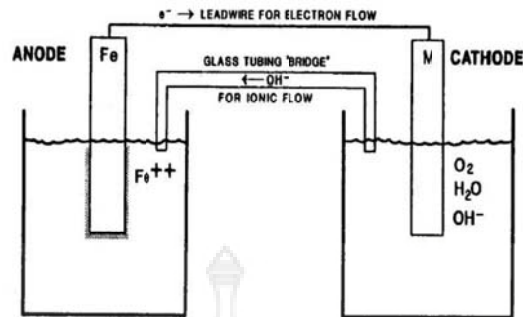


**TWO POINT LOADING SETUP IN FLEXURE TEST**

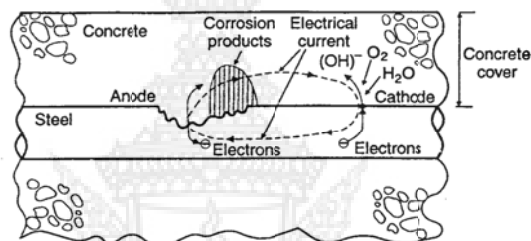
ภาพที่ 2.3 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 78

### 2.3 การกัดกร่อนและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

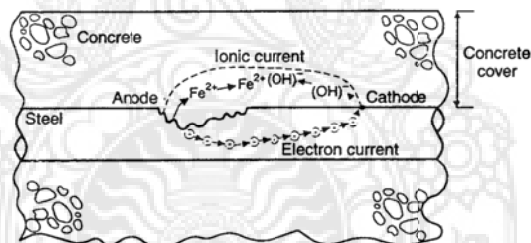
การกัดกร่อนของเหล็กเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีโดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ Anode Cathode และ Electrolyte โดยมีความสัมพันธ์กันอธิบายได้ ซึ่งเทียบได้กับการเกิด การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งเกิดจากการที่อะตอมของเหล็กเกิดการแตกตัวเป็น  $Fe^{+2}$  และเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนทำให้บริเวณนั้นเกิดเป็นขั้ว Anode ดังสมการที่ 5 อิเล็กตรอนนี้จะมีมากขึ้นบริเวณผิวของเหล็กเสริมทำให้เกิดศักย์ทางไฟฟ้าขึ้น ในบริเวณที่ไม่เกิดการแตกตัวของเหล็กจะมีศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่าจะทำหน้าที่เป็นขั้ว Cathode อิเล็กตรอนที่เกิดจาก Anode จะเคลื่อนที่ตามเหล็กเสริมมายัง Cathode ที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าและทำปฏิกิริยากับ Oxygen และน้ำที่อยู่บริเวณนี้ เกิด Hydroxyl อีออน ( $OH^-$ ) ขึ้น ดังสมการที่ 7 การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นทั้งกระแสภายในเหล็กและกระแสภายนอกเหล็ก กระแสภายในเหล็กเป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จาก Anode ไปสู่ Cathode และกระแสภายนอกเหล็กเป็นการเคลื่อนที่ของอีออน  $Fe^{+2}$  และ  $OH^-$  ผ่าน Pore Solution ของคอนกรีตรอบๆเหล็กเสริม (Bentur et al., 1997) โดยประจุลบคือ  $OH^-$  จะเคลื่อนที่จาก Cathode สู่ Anode และประจุบวก  $Fe^{+2}$  จะเคลื่อนที่จาก Anode สู่ Cathode การเคลื่อนที่ของอีออนผ่าน Pore Solution ของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่สำคัญของการเกิดการกัดกร่อน สารละลายในช่องว่างส่วนใหญ่เป็นสารละลายของ Alkali และ Calcium Hydroxide เปรียบเหมือนเป็นสารละลาย Electrolyte ทำให้เกิดการครบวงจรของ Galvanic Cell และเกิดการกัดกร่อนขึ้นได้ แต่ถ้าน้ำในช่องว่างนี้แห้งหรือโครงสร้างภายในของคอนกรีตที่บีบแน่นและช่องว่างภายในเกิดขึ้นไม่ต่อเนื่องการไหลของอีออนผ่านจะเกิดขึ้นได้ยากขึ้น ซึ่งทำให้การเกิดการกัดกร่อนช้าลงหรือระงับหยุด



ภาพที่ 2.4 เซลล์ไฟฟ้าเคมีของการเกิดการกัดกร่อนในเหล็กที่มา; วรเดช (2546)

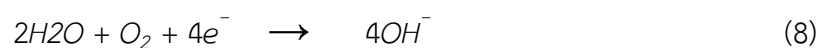


ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้ว Anode และ Cathode



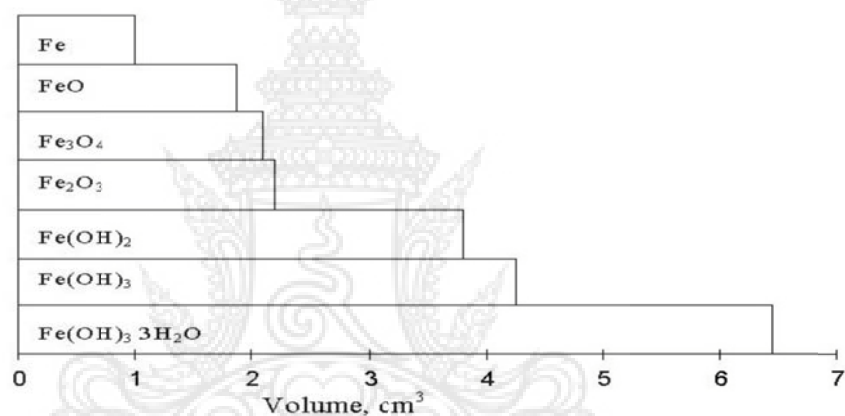
(ข) การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าภายในและภายนอกเหล็กเสริม

ภาพที่ 2.5 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนบนผิวเหล็กเสริมที่มา; 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 ผลิตภัณฑ์ซึ่งเกิดขึ้น

จากปฏิกิริยาของการกัดกร่อนคือสนิมในรูปแบบต่างๆ ซึ่งมีปริมาณมากกว่าเหล็กก่อนเกิดปฏิกิริยา 4 ถึง 6 เท่า(Nielsen, 1985) ซึ่งทำให้เกิดแรงดันภายในและคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ นอกจากนี้ในส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเหล็กเสริมบางจุดเกิดการสูญเสียเนื้อเหล็กและหน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงส่งผลต่อการรับแรงของโครงสร้างซึ่งถ้าไม่ได้รับการแก้ไขอาจเป็นอันตรายถึงขั้นการวิบัติของโครงสร้างได้



ภาพที่ 2.6 ปริมาตรสัมพัทธ์ของเหล็กและผลิตภัณฑ์ของการสนิม  
ที่มา; วรเดช (2546)

## 2.4 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

โดยทั่วไปสารประกอบคลอไรด์ไม่ส่งผลที่เป็นอันตรายกับเนื้อของคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริม ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้น้ำ ที่มีคลอไรด์ผสมในคอนกรีตกลับส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้นเพราะเป็นสารเร่งการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต แต่การใช้งานของคอนกรีตในโครงสร้างทั่วไป จำเป็นอย่างยิ่งต้องใส่เหล็กเสริมเข้าไปในคอนกรีตเพื่อมารับแรงดึงเพราะจากคอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงดึงได้น้อยมาก และการที่คอนกรีตมีเหล็กเสริมนี้เองจึงส่งผลให้การทำลายเนื่องจากคลอไรด์ต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความชัดเจนและรุนแรงมาก ทั้งนี้เนื่องจากการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนจากสารเคมีอื่นตรงที่คลอไรด์สามารถทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมและคอนกรีตบริเวณรอบๆเหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหายเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริม ซึ่งดันคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าว ตลอดจนทำให้ความสามารถในการรับแรง

ยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมและคอนกรีตต่ำลงและเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ ลายคอนกรีตเสริมเหล็ก โดย ลักษณะการทำ ลายของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมจริง แสดงดังรูป



รูปที่ 2.7 ความเสียหายเนื่องจากคลอไรด์โดยเหล็กเป็นสนิมต้นคอนกรีต  
ที่มา; [www.nonyrico.com](http://www.nonyrico.com)

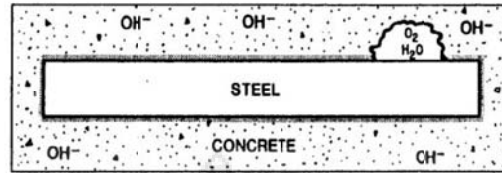
การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม และคอนกรีตบริเวณรอบๆ เหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหาย เนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมและเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ลายของค่าการคอนกรีตเสริมเหล็ก หลังการเกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชันจะเกิดผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งเกิดขึ้นนั่นคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) 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 เหล็กก็จะ เป็นสนิม

## 2.5 ผลกระทบของคลอไรด์ในคอนกรีต

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

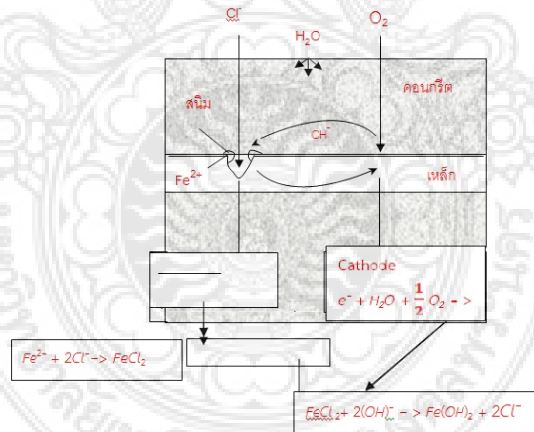
โดยธรรมชาติเหล็กเสริมในคอนกรีตจะมี Passivation จาก  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ปกป้องเหล็กเสริมจากการเกิดสนิม ดังภาพที่ 2.8 Passive layer ที่เคลือบที่ผิวของเหล็กเสริมทำให้อัตราการแพร่ของ Oxygen และน้ำ มาสู่ผิวเหล็กเสริมลดลงทำให้อัตราการเกิดการกัดกร่อนลดลง โดย Passive layer นี้มีเสถียรภาพอยู่ได้ในสภาวะความเป็นด่างสูง ซึ่งเป็นธรรมชาติของคอนกรีตที่มี  $\text{Ca(OH)}_2$  KOH และ

NaOH ทำให้คอนกรีตมี pH อยู่ในช่วง 12 ถึง 13 คอนกรีตจึงเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติปกป้องเหล็กเสริมจากการเกิดสนิมตามธรรมชาติ



ภาพที่ 2.8 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  $\gamma \cdot Fe_2O_3$  ซ้ำรวมตัวกับ  $\gamma \cdot Fe_2O_3$  โดยเข้าแทนที่ Oxygen บางตัวและเกิดเป็น complex ละลายออกสู่ภายนอก ทำให้ Passive layer เกิดความเสียหาย เหล็กเสริมเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้โดยง่าย ซึ่งกัดกร่อนแบบ pitting corrosion นอกจากนี้คลอไรด์ยังทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเข้าทำปฏิกิริยากับ  $Fe^{+2}$  เกิดเป็น  $FeCl_2$  และ  $FeCl_2$  ทำปฏิกิริยาต่อกับ  $OH^-$  เกิดเป็น  $Fe(OH)_2$  และเหลือ คลอไรด์กลับมาทำปฏิกิริยาใหม่ได้อีก ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การเข้าทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมของคลอไรด์  
ที่มา; S.Mindess, J.F.Young and D.Darwin.,(2003)

## 2.6 การแพร่ในคอนกรีต

ความทนทานของคอนกรีตขึ้นอยู่กับความยากง่ายที่ของเหลวหรือก๊าซสามารถผ่านเข้าสู่คอนกรีตผ่านทาง pore system ภายในเพสต์และ interface zone บริเวณระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวม (Neville, 1995) ซึ่ง interface zone เป็นบริเวณที่มีการเกิด microcrack จำนวนมากด้วยเหตุนี้ interface zone จึงเป็นช่องทางสำคัญของเหลวหรือก๊าซจากภายนอกผ่าน

เข้าไปในคอนกรีต(Young, 1988) อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าใน interface zone มีความพรุน (porosity) ที่สูงกว่า แต่ความสามารถในการซึมได้ของคอนกรีตยังคงขึ้นกับคุณสมบัติของส่วนที่เป็น เพสต์ (Larbi, 1993) ซึ่งจะเห็นได้จากความซึมได้ของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วไม่ได้ต่ำกว่าของ คอนกรีตที่ผสมขึ้นจากซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมเดียวกัน นอกจากนี้การที่คอนกรีตมีมวลรวมจะทำให้ เส้นทางในการซึมผ่านคดเคี้ยวเพิ่มระยะทางในการซึมผ่านมากขึ้น ซึ่งในมวลรวมอาจจะมีช่องว่าง เช่นเดียวกัน แต่ช่องว่างในมวลรวมตามปกติจะไม่ต่อเนื่องกันและมวลรวมยังถูกหุ้มเคลือบด้วยซีเมนต์ เพสต์ ดังนั้นช่องว่างในมวลรวมจึงไม่ถือว่าเป็นช่องทางซึมผ่านของของเหลวหรือก๊าซ

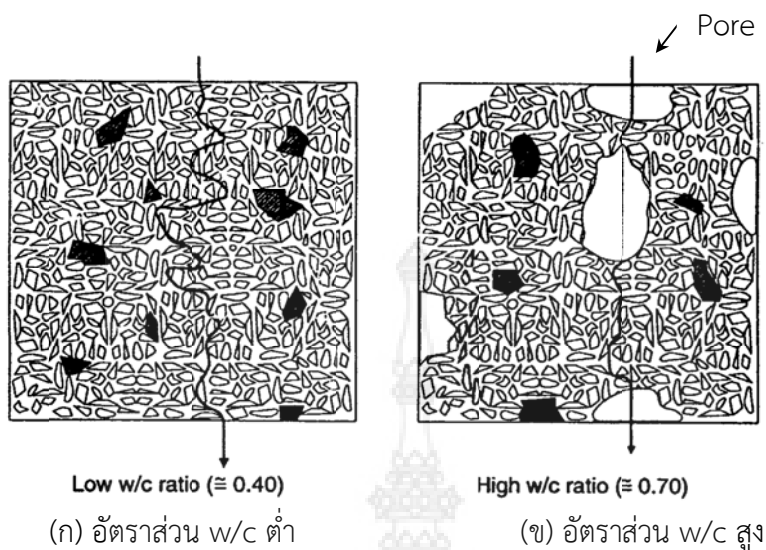
เมื่อพิจารณาถึงความซึมได้ของคอนกรีต กลไกของความซึมได้ของคอนกรีตสามารถแบ่งได้ เป็น 3 กลไก ที่แตกต่างกัน ความสามารถในการซึมได้ (permeability) คือการไหล (flow) ภายใต้ ความแตกต่างของความดัน, การแพร่ (diffusion) คือการเคลื่อนที่ของของไหล (fluid) ภายใต้ความ เข้มข้นที่แตกต่างกันและ sorption คือการเคลื่อนที่ของของไหลเนื่องจากแรงดึง capillary ที่เกิดขึ้น เฉพาะกับคอนกรีตที่กึ่งเปียกกึ่งแห้ง

การแพร่ในคอนกรีตจะเกิดขึ้นเมื่อออสโมซิสในสารละลายภายนอกมีความเข้มข้นมากกว่าความ เข้มข้นในช่องว่างของคอนกรีต 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  $D$  คือค่าคงที่ของการ แพร่ในหน่วย  $m/s^2$  ค่าคงที่ของการแพร่จะคงที่ในสภาพใดสภาพหนึ่งเท่านั้น โดยจะแปรเปลี่ยน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิคุณสมบัติของสารที่แพร่และคุณสมบัติของวัสดุที่เกิดการแพร่ ในคอนกรีตการแพร่ ส่วนใหญ่เกิดขึ้นผ่านช่องว่างในส่วนที่เป็นเพสต์ของคอนกรีต และอาจจะเกิดขึ้นบางส่วนบริเวณ interfacial zone ในบริเวณระหว่างเพสต์และมวลรวม ดังนั้นในคอนกรีตที่ที่บ่มแน่นเนื่องจากมี อัตราส่วน W/C ที่ต่ำช่องว่างส่วนใหญ่จะไม่ต่อเนื่องและเส้นทางการแพร่จะคดเคี้ยวเพิ่มระยะทางใน การแพร่ (Bentur et al., 1997) ดังนั้นค่าคงที่ของการแพร่ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วน W/C ที่ต่ำจะมี ค่าน้อยและในคอนกรีตที่มีอัตราส่วน W/C ที่สูงเพสต์จะมีความพรุนมากกว่าและมีช่องว่างที่ใหญ่และ มีความต่อเนื่องของช่องว่าง ดังนั้นค่าคงที่ของการแพร่จะมีค่าที่สูงกว่า นอกจากอัตราส่วน W/C จะ มีผลต่อการแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตแล้ว มีรายงานจำนวนมากระบุว่าถ้าลอยมีผลทำให้ค่าคงที่ของ การแพร่ของไอออนคลอไรด์ลดลงและเป็นการเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดการกัดกร่อนในเหล็กเสริม ในคอนกรีต

Thomas (1996) ศึกษาคอนกรีตผสมถ้าลอยในสภาพแวดล้อมที่ติดกับทะเลในช่วง 1 ถึง 4 ปี โดยตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กประสบกับสภาพน้ำขึ้นน้ำลง ค่าการสูญเสียมวลของเหล็กเสริม นำมาเปรียบเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณเหล็กเสริมและพบว่าระดับของคลอไรด์ที่สูงที่สุด



ภาพที่ 2.10 เส้นทางน้ำในคอนกรีต

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

โดยที่การสูญเสียมวลของเหล็กเสริมจากการกัดกร่อนไม่เห็นชัดเจนแปรเปลี่ยนไปตามปริมาณของเถ้าลอย และสรุปว่าเถ้าลอยคอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีในการป้องกันเหล็กเสริมในสภาวะแวดล้อมที่ติดทะเล

Cabrera(1996) ศึกษาผลของอัตราการกัดกร่อนต่อการแตกของตัวอย่างและการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมและอิทธิพลของเถ้าลอยต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริม พบว่าเถ้าลอยคอนกรีตมีคุณสมบัติต้านทานต่อการเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนดีกว่าคอนกรีตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ปกติ

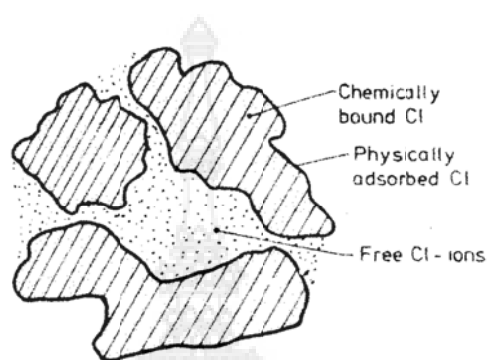
Ampuda et al.(1999) ศึกษาผลของเถ้าลอยต่อการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์โดยใช้วิธี accelerated chlorides ion diffusion test และผลที่ได้จากการทดสอบจะนำมาใช้ในการคำนวณค่าคงที่ของการแพร่ของคลอไรด์โดยใช้สมการ Nemst - Plank พบว่าค่าคงที่ของการแพร่ของไอออนคลอไรด์ในซีเมนต์ผสมเถ้าลอยอยู่ในช่วง  $10^{-7}$  และ  $10^{-9}$   $\text{cm}^2/\text{s}$  และซีเมนต์ที่ผสมเถ้าลอยทำให้ค่าคงที่ของการแพร่ลดลงอย่างมากโดยเฉพาะหลังการบ่ม และอัตราส่วนแทนที่เถ้าลอย 40% ให้ผลดีที่สุดเมื่อคำนึงถึงเฉพาะการแพร่ในซีเมนต์ผสมเถ้าลอย โดยอัตราส่วน W/B มีผลต่อค่าคงที่ของการแพร่ไอออนคลอไรด์เฉพาะช่วงต้นของอายุการบ่มแต่มีผลน้อยลงในช่วงหลังของการบ่ม

## 2.7 คุณสมบัติการจับยึดคลอไรด์ของเถ้าลอยในคอนกรีต

การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณคลอไรด์ไอออนมากพอที่ผิวของเหล็กเสริมซึ่งปริมาณคลอไรด์ดังกล่าวไม่ได้หมายถึงคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride Content) ที่ทำให้เกิดสนิมขึ้นในเหล็กเสริม เนื่องจากว่าคลอไรด์บางส่วนถูกจับยึดทางเคมี (Chemical Binding) โดยเข้าทำปฏิกิริยารวมอยู่ในผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ และบางส่วนถูกจับยึดอยู่บนผิวของ

gel pore ในลักษณะกายภาพ (Physical Binding) และคลอไรด์ที่เหลือคือคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) ที่อยู่ใน pore Solution ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนในเหล็กเสริม ภาพที่ 2.11 แสดงรูปแบบของคลอไรด์ในคอนกรีต

ในกรณีของคลอไรด์ในคอนกรีตจากแหล่งภายใน ซึ่งอาจได้มาในระหว่างการผสมโดยอาจมาจากวัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต เช่น หิน ททราย น้ำที่ใช้ผสมที่มีการปนเปื้อนคลอไรด์



ภาพที่ 2.11 รูปแบบของคลอไรด์ที่แตกต่างกันของคอนกรีต  
ที่มา; S.Mindess, J.F.Young and D.Darwin.,(2003)

มาจากน้ำยาผสมคอนกรีต เช่น สารเร่งการก่อตัว  $\text{CaCl}_2$  คลอไรด์อิสระจะทำปฏิกิริยากับ 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  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  หรือในรูปย่อคือ  $\text{C}_3\text{AH}_6$  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

ความสามารถในการจับยึดคลอไรด์ในคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อมีการผสมเถ้าลอยในคอนกรีต โดยศึกษาการปรับปรุงความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีต โดยการใช้การผสมเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์จนถึง 67% และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ พบว่าความสามารถในการจับยึดคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงการแทนที่เถ้าลอย 50% แต่เมื่อการแทนที่ซีเมนต์ของเถ้าลอยมากกว่านี้ความสามารถในการจับยึดคลอไรด์จะลดลง Jensen and Pratt (1989) ศึกษาการจับยึดคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย (Class F) 30% โดยใช้น้ำทะเลจำลองและทดสอบการให้คลอไรด์ทั้งแบบระหว่างผสม และ แบบให้แพร่ผ่านเพสต์ ในการให้คลอไรด์ระหว่างผสมพบว่าชั้นแรกซัลเฟตจะทำปฏิกิริยาเกิดเป็น ettringite และเกิด Friedel's salt ตามมา



ในการให้คลอไรด์แพร่ผ่านเพสต์พบว่าคลอไรด์และซัลเฟตในน้ำทะเลจะแพร่ผ่านเข้าสู่คอนกรีต โดยคลอไรด์แพร่ได้เร็วกว่าซัลเฟต เข้าทำปฏิกิริยาเกิดเป็น Friedel's salt และพบว่าในตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยมี Friedel's salt มากขึ้น

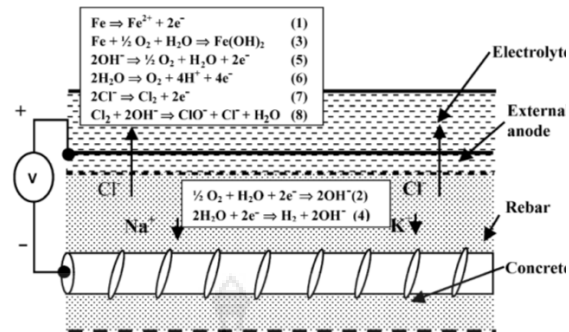
Arya et al. (1990) ศึกษาการจับยึดคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย 0, 15 และ 35% และผสม ground blast furnace slag (GBFS) 70% และผสมซิลิกาฟูม 15% โดยใช้ W/B เท่ากับ 0.5 และใส่ NaCl  $Cl^-$  1% ในระหว่างการผสมซีเมนต์เพสต์ หลังจากนั้นบ่มตัวอย่าง 28 วัน ก่อนนำมาทดสอบ พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณทั้งเถ้าลอยและ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

Arya and Xu (1995) ศึกษาผลกระทบของชนิดของแร่ธาตุผสมเพิ่มที่ใช้แทนที่ซีเมนต์โดยใช้ GBFS 65%, เถ้าลอย (FA) 35% และซิลิกาฟูม (SF) 10% โดยใช้ W/B เท่ากับ 0.5 และผสม NaCl ในระหว่างการผสมเพสต์ ใช้ปริมาณ  $Cl^-$  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  $Cl^-$  ของน้ำหนักซีเมนต์ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต และใช้ W/B เท่ากับ 0.37 ในส่วนผสมที่ไม่ใส่เถ้าลอยและ 0.32 ในส่วนผสมที่ผสมเถ้าลอย พบว่าการผสมเพิ่มเถ้าลอยในคอนกรีตเป็นการเพิ่มความสามารถในการจับยึดคลอไรด์

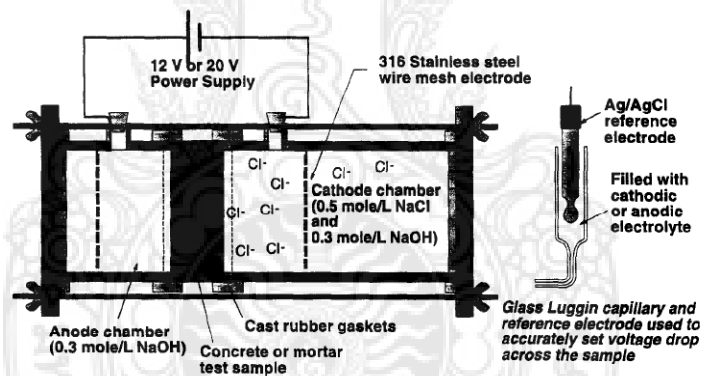
## 2.8 การลดปริมาณคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

การลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Chloride Removal) คือการเอาเฉพาะคลอไรด์ไอออนออกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าอยู่ในสารละลายซึ่งอยู่นอกคอนกรีตและมีการเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมภายในคอนกรีตมีการให้ไฟฟ้าตรงกับขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมคอนกรีตโดยให้ขั้วไฟฟ้าภายนอกเป็นขั้วบวก (Anode) และเหล็กเสริมเป็นขั้วลบ (Cathode) จากการต่อระบบดังนี้ เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สูงพอคลอไรด์ไอออนที่มีสภาพเป็นขั้วลบจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวกซึ่งอยู่นอกคอนกรีตมีผลทำให้ความหนาแน่นของคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตมีค่าลดลงดังแสดงในภาพที่ 2.12



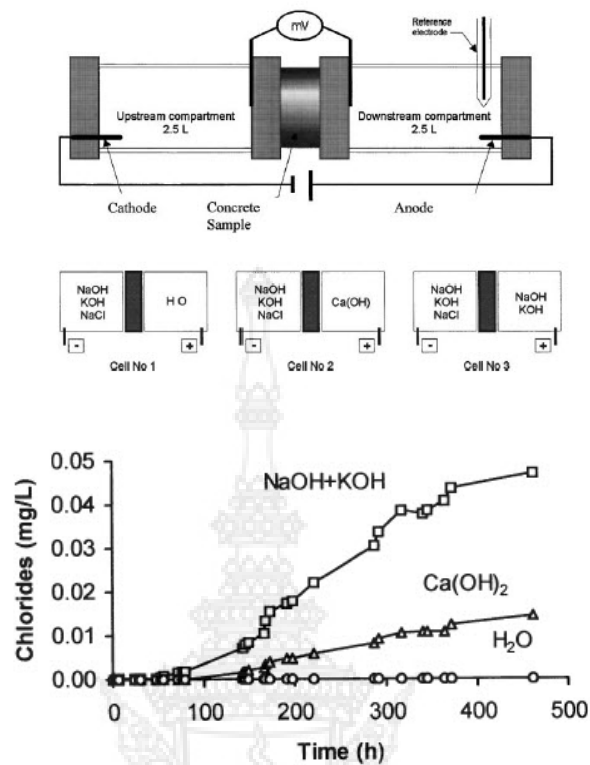
ภาพที่ 2.12 แสดงขบวนการของวิธี Electrochemical Chloride Removal (ECR)  
ที่มา: J.M. Miranda et. al, 2005

P.F. McGrath and R.D. Hooton (1996) ได้ทำการทดสอบ Chloride Migration Test โดยใช้คอนกรีตที่มีปริมาณส่วนผสมเดียวกันทุกตัวอย่างการทดลองและทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆกันในการทดลองและทำการวัดปริมาณคลอไรด์ที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายประจุบวก (Anolyte) ในการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.13



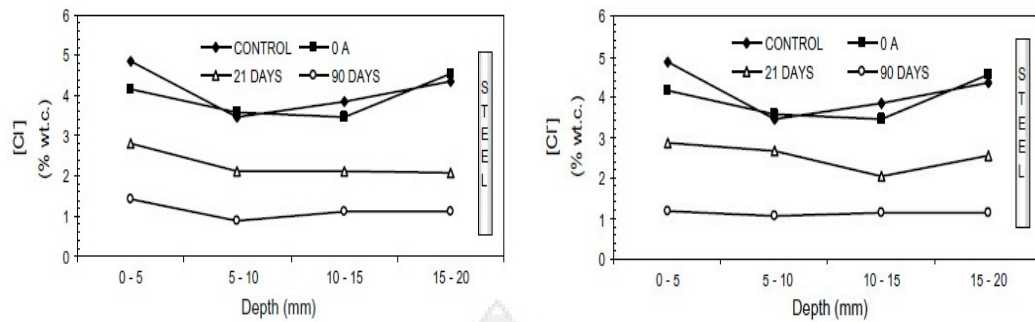
ภาพที่ 2.13 แสดงการทดสอบ Chloride Migration Test  
ที่มา: P.F. McGrath and R.D. Hooton (1996)

การทดสอบ Chloride Migration Test นั้นสารละลายที่ใช้ในการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ยังมีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ซึ่ง W. Prince และ R. Gagne (2000) ได้รายงานผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตด้วยวิธี Chloride Migration Test ของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณส่วนผสมเดียวกันโดยใช้สารละลายที่มีศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกบวก 3 ชนิดและใช้กระแสไฟฟ้าในการทดสอบขนาด 12 โวลต์ในทุกตัวอย่างโดยผลการทดลองพบว่าผลกระทบของสารละลายมีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตดังแสดงในภาพที่ 2.13 โดยในรายงานผลการทดลองได้รายงานผลว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นการจำลองสารละลายในช่องว่างของคอนกรีตสามารถถึงปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในสารละลายได้มากกว่าสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์และการใช้น้ำเป็นสารละลาย



ภาพที่ 2.14 แสดงอิทธิพลของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ Chloride Migration Test  
ที่มา: W. Prince and R. Gagne, 2000

G.Fajardo et. al (2004) ได้เสนองานวิจัยเรื่อง Electrochemical Chloride Extraction (ECE) from Steel-Reinforced Concrete Specimens Contaminated by “Artificial” Sea-Water โดยทำการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5 ซม. และ 11 ซม. และนำไปแช่ในสภาวะน้ำทะเลเทียมโดยมีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งเป็นการจำลองคุณสมบัติให้เหมือนน้ำทะเลในมหาสมุทรแอตแลนติกโดยนำไปแช่อยู่ในน้ำทะเลเทียมเป็นเวลา 3 วัน และนำมาอบในตู้อบอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 วัน ซึ่งเป็นการเร่งการซึมผ่านของคลอไรด์ให้เข้าสู่ตัวอย่างในการทดลองในสภาวะเปียกสลับแห้งตลอดระยะเวลาในการทดลอง 300 วัน และทำการหาปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีระหว่างเปลี่ยนสารละลายในระหว่างการทดลองและไม่เปลี่ยนสารละลายดังแสดงในภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 ปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในคอนกรีตก่อนและหลังขบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยการเปลี่ยนสารละลายใหม่และไม่เปลี่ยนสารละลาย  
ที่มา: G.Fajardo et al (2004)

ภาพที่ 2.15 แสดงประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีที่อยู่ภายในคอนกรีตที่ใช้ในการทดลองโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ไอออนระหว่างการเปลี่ยนสารละลายในการทดลองทุก 2 วันจะเห็นได้ว่าระหว่างการเปลี่ยนสารละลายและไม่ได้เปลี่ยนสารละลาย ประสิทธิภาพของการดึงคลอไรด์ในคอนกรีตไม่ได้ลดลง แต่อิทธิพลที่ส่งผลต่อการดึงคลอไรด์นั้นคือระยะเวลาในการทำการจ่ายกระแสไฟฟ้า มีประสิทธิภาพไปในทางเดียวกันกล่าวคือการทำ การดึงคลอไรด์ที่ระยะเวลา 90 วันสามารถดึงคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตมากกว่าการทดลองที่ 21 วันในทุกๆระยะความลึกต่างๆ

### บทที่ 3

#### วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้เป็นการดำเนินการวิจัยประกอบด้วยวัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ใน งานวิจัยตลอดจนขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง และวิธีการทดสอบอื่นๆที่เกี่ยวข้องในวิจัยนี้

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

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

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

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

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

3.1.5 วัสดุอุปซโซลาน (เถ้าลอย, ดินขาวและผงซิลิกา) (เถ้าลอยจากโรงงานผลิตไฟฟ้า จ.ลำปาง และ ดินขาวเผาสำเร็จรูป นำเข้าจากสหรัฐอเมริกา บริษัท Metamax จำกัด

3.1.6 สารลดน้ำพิเศษประเภท (Superplasticizer)

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1. เครื่องทดสอบกำลังของคอนกรีต

3.2.2. แบบหล่อคอนกรีตตัวอย่าง

ทรงกระบอก 10 x 20 เซนติเมตร

ทรงลูกบาศก์ 10 x 10 x 10 เซนติเมตร

รูปแบบคาน ขนาด 10 x 20 x 35 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. เครื่องหาปริมาณคลอไรด์อออนในสารละลาย (Metrohm 781 pH/Ion Meter)
- 3.2.13. อะคลีติก ซิลิโคน และแผ่นแสดนเลสสตีล
- 3.2.14 เเวอร์เนียคาลิปเปอร์
- 3.2.15 โต๊ะทดสอบการไหลแผ่ (Flow table)
- 3.2.16 เครื่องทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength) ขนาด 75 ตัน
- 3.2.17 ตะแกรงร่อนมาตรฐาน
- 3.2.18 เครื่องทดสอบ Chloride Migration Test
- 3.2.19 ชุดทดสอบการยุบตัว (Slump Test)

### 3.3 สัดส่วนผสมคอนกรีตและสัญลักษณ์

สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัยได้ถูกออกแบบตามการแนะนำของ ACI 211.1-91 โดยออกแบบให้มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.42 และ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ : ทราย : หินเท่ากับ 1 : 2 : 4 โดยปริมาตร ซึ่งปริมาณวัสดุที่ใช้สำหรับอัตราส่วนผสมของคอนกรีต 1 ลบ.ม.สรุปได้ดังตารางที่ 3-1

#### สัญลักษณ์

OPC หมายถึง คอนกรีตธรรมดา

OPC/FA20/MK15 หมายถึง ปูนซีเมนต์/เถ้าลอย20%/ดินขาว15%

OPC/FA25/MK10 หมายถึง ปูนซีเมนต์/เถ้าลอย25%/ดินขาว10%

OPC/FA20/SLP5 หมายถึง ปูนซีเมนต์/เถ้าลอย20%/ผงซิลิกา 5%

OPC/FA25/SLP2.5 หมายถึง หมายถึง ปูนซีเมนต์/เถ้าลอย25%/ผงซิลิกา 2.5%

ตัวเลขต่อท้าย หมายถึง ปริมาณวัสดุปอซโซลานเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

### 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
- วัสดุปอซโซลาน (เถ้าลอย, ดินขาวและผงซิลิกา)

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม (สภาวะอิมตัวผิวแห้ง)

คุณสมบัติ	มวลรวมละเอียด	มวลรวมหยาบ
หน่วยน้ำหนัก (Bulk Density) กก.ต่อ ลบ.ม.	-	1600
ความดูดซึม (Absorption) เปอร์เซ็นต์	1.00	0.60
ความถ่วงจำเพาะ (Apparent Specific Gravity)	2.60	2.75
โมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus)	2.95	-

#### 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 (ปริมาณน้ำหนัก กก. ต่อลูกบาศก์เมตร)

ชื่อตัวอย่าง	W/C	SP (%)	ปริมาณซีเมนต์ (Kg/m <sup>3</sup> )	เถ้าลอย (Kg/m <sup>3</sup> )	ดินขาว (Kg/m <sup>3</sup> )	ผงซิลิกา (Kg/m <sup>3</sup> )	หิน (SSD) (Kg/m <sup>3</sup> )	ทราย (SSD) (Kg/m <sup>3</sup> )	น้ำ
OPC	0.40	-	440	-	-	-	721	1066	176
OPC/FA20/MK15		0.70	286	88	66	-			
OPC/FA25/MK10		0.70	286	110	44	-			
OPC/FA20/SLP5		0.70	330	88	-	22			
OPC/FA25/SLP2.5		0.80	319	110	-	11			
OPC	0.45	-	440	-	-	-	721	1066	198
OPC/FA20/MK15		0.50	286	88	66	-			
OPC/FA25/MK10		0.50	286	110	44	-			
OPC/FA20/SLP5		0.70	330	88	-	22			
OPC/FA25/SLP2.5		0.70	319	110	-	11			
OPC	0.50	-	440	-	-	-	721	1066	220
OPC/FA20/MK15		0.50	286	88	66	-			
OPC/FA25/MK10		0.50	286	110	44	-			
OPC/FA20/SLP5		0.70	330	88	-	22			
OPC/FA25/SLP2.5		0.70	319	110	-	11			

ตารางที่ 3.3 แสดงจำนวนตัวอย่างและการทดสอบ

Mixed proportion	w/c	Number of specimen				Total
		Compressive Strength	Flexural Strength	Splitting Tensile Strength	Chloride Penetration	
OPC	0.4	3	3	3	1	10
OPC/FA20/MK15		3	3	3	1	10
OPC/FA25/MK10		3	3	3	1	10
OPC/FA20/SLP5		3	3	3	1	10
OPC/FA25/SLP2.5		3	3	3	1	10
OPC	0.45	3	3	3	1	10
OPC/FA20/MK15		3	3	3	1	10
OPC/FA25/MK10		3	3	3	1	10
OPC/FA20/SLP5		3	3	3	1	10
OPC/FA25/SLP2.5		3	3	3	1	10
OPC	0.5	3	3	3	1	10
OPC/FA20/MK15		3	3	3	1	10
OPC/FA25/MK10		3	3	3	1	10
OPC/FA20/SLP5		3	3	3	1	10
OPC/FA25/SLP2.5		3	3	3	1	10
Total						150

### 3.5 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

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

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

2) ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับวัสดุพอลิโพรพิลีน และผสมเส้นใยสังเคราะห์ที่ได้คำนวณไว้ผสมเข้าด้วยกัน แล้วเติมน้ำผสมคลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เข้าด้วยกันใช้เวลาประมาณ 3-5 นาที

3) วางแบบทดสอบการไหลแผ่นบโตะทดสอบพยายามให้อยู่กึ่งกลางแท่นทดสอบเทซีเมนต์มอร์ตาร์ลงในแบบหนาประมาณครึ่งหนึ่งของแบบใช้แท่งเหล็กกระทุ้งซีเมนต์มอร์ตาร์ 20 ครั้ง



4) ใส่ซีเมนต์มอร์ตาร์เพิ่มอีกครั้งจนล้นแบบกระทงเพิ่มอีก 20 ครั้ง และปาดหน้าซีเมนต์มอร์ตาร์ส่วนเกินออกให้เสมอขอบแบบ

5) จากนั้นยกแบบขึ้นในแนวตั้งอย่างรวดเร็วแล้วหมุนแทน ตกกระทบจำนวน 25 ครั้ง ในเวลา 15 วินาที

6) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แผ่กระจายบนแทนทดสอบจำนวน 4 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง จากนั้นคำนวณหาค่าการไหลแผ่ด้วยสมการ

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

เมื่อกำหนดให้

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

$D_1$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแบบทดสอบ

$D_2$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของซีเมนต์มอร์ตาร์บนแทนทดสอบ

### การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตในสภาพที่แข็งตัว

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

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

#### 3.5.3 ตัวอย่างคอนกรีตขนาด $10 \times 10 \times 10$ เซนติเมตร

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

#### 3.5.4 ตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $10 \times 20$ เซนติเมตร

การทดสอบกำลังดึงใช้แบบตัวอย่างทดสอบขนาด  $10 \times 20$  เซนติเมตร ในขั้นตอนการผสมส่วนผสมของคอนกรีตทดสอบจะเริ่มต้นโดยผสม หิน ทราย ปูนซีเมนต์และสารผสมเพิ่มในไม่ผสมให้เข้ากันก่อน คลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เข้าโดยใช้เวลาประมาณ 3-5 นาที จากนั้นทำการเทคอนกรีตดังกล่าวลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้ ภายหลังจากหล่อคอนกรีตทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จึง

ทำการถอดแบบหล่อออกซึ่งตัวอย่างทดสอบที่เตรียมได้ จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปบ่มในสภาวะ บ่มน้ำ 28 วัน

3.5.5 การเตรียมสารละลายทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้าโดยวิธี Chloride Migration Test โดยเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 5 วัน และทำการเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อนำมาเป็นสื่อในการนำไฟฟ้าในการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้าโดยวิธี Chloride Migration Test โดยทำการเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 2 ชนิด ได้แก่

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

### 3.6 วิธีการทดสอบ

#### 3.6.1 การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength )

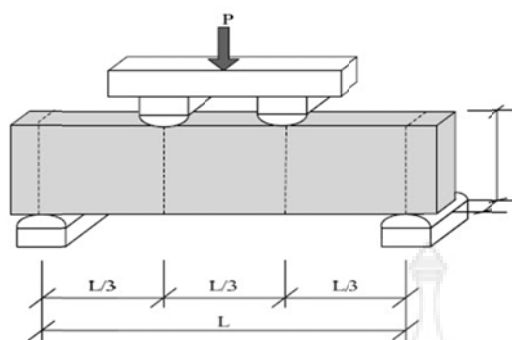
การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 10 x 10 x 10 เซนติเมตร ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C 39 เพื่อทำการทดสอบหาค่าความต้านทานแรงอัดของคอนกรีต



ภาพที่ 3.1 ภาพตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานของคอนกรีต ASTM C 39

#### 3.6.2 การทดสอบกำลังดัด (Flexural Strength)

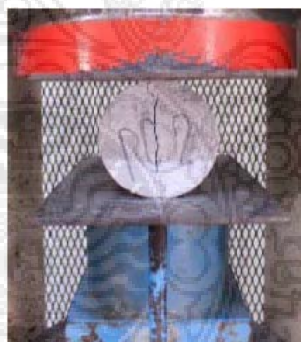
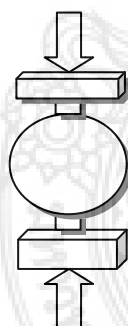
การทดสอบกำลังดัด (Flexural Strength) ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C 78 (Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam With Third-Point Loading) เครื่อง UTM ขนาด 1500 kN ค่า Load-Deflection ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์และคำนวณหาค่าหาค่าดัชนีความเหนียว (Toughness Indices) ตามมาตรฐาน ASTM C 1018-97 (Flexural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

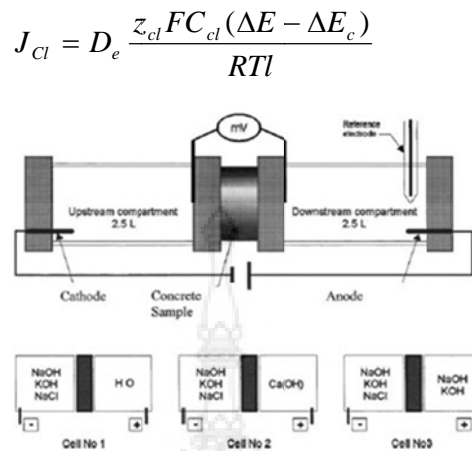
การทดสอบกำลังดึงแยกของคอนกรีต (Splitting Tensile Strength) ดำเนินการตามมาตรฐานของ ASTM C 496 ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร วางนอนเพื่อรับแรงกดที่ส่งผ่านไม้อัดจะทำให้เกิดแรงดึงขึ้นตลอดหน้าตัด



ภาพที่ 3.3 ภาพตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตตามมาตรฐานของ ASTM C 496

### 3.6.4 การทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตด้วยวิธี Chloride Migration Test

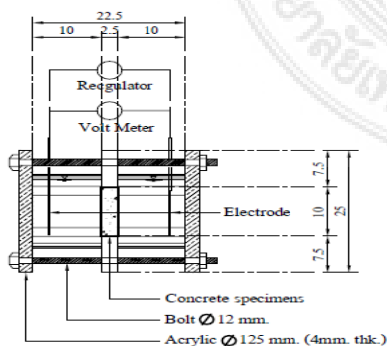
ทำการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยใช้ปฏิกิริยาส่วนผสมเดียวกันกับข้างต้นและทำการบ่มคอนกรีตเป็นเวลา 28 วันหลังจากนั้นทำการตัดคอนกรีตด้วยเครื่องตัดคอนกรีตเพื่อทำการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อออนด้วยไฟฟ้าโดยวิธี Chloride Migration Test โดยใช้สมการของ Nernst planck (Modified Fick's second law) จากมาตรฐาน JSCE -G571-2003 เพื่อยืนยันผลการทดลองการเคลื่อนที่ของคลอไรด์โดยนำคอนกรีตที่ทำการตัดมาเคลือบอีพ็อกซีด้านข้าง ทำการแช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจากนั้นทำการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด 12 โวลต์ดังแสดงในภาพที่1 และทำการวัดปริมาณคลอไรด์อออนที่อยู่ในสารละลายทุก 4 วันด้วยเครื่อง Chloride Analyzer



ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างการเตรียมก่อนคอนกรีตเข้าเครื่องทดสอบ

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

การทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตด้วยวิธี Chloride Migration Test ของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณส่วนผสมเดียวกันโดยใช้สารละลายที่มีศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกบวก 3 โวลต์และใช้กระแสไฟฟ้าในการทดสอบขนาด 12 โวลต์ในทุกตัวอย่างโดยผลการทดลองพบว่าผลกระทบของสารละลายมีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตดังแสดงในภาพที่ 3.5 โดยในรายงานผลการทดลองได้รายงานผลว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นการจำลองสารละลายในช่องว่างของคอนกรีตสามารถดึงปริมาณคลอไรด์ไอออนมาสะสมอยู่ในสารละลายได้มากกว่าสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์และการใช้น้ำเป็นสารละลาย



ภาพที่ 3.5 ตัวอย่างการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้า Chloride Migration Test

### 3.6.5 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีต

#### 3.6.5.1 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธี Argentometric หรือ Mohr Method

1. นำน้ำตัวอย่าง (ผงปูน 4-5 กรัมแห้งทิ้งไว้ในน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 วัน) มากรองด้วยกระดาษกรองลงในขวดรูปกรวยขนาด 250 มิลลิลิตรและวัดปริมาตรของสารละลายที่กรองมาได้ในกระบอกตวง และบันทึกปริมาตรของสารตัวอย่างไว้

2. ปรับ pH ของสารละลายตัวอย่างให้เป็นกลาง เพราะ  $\text{Ag}^+$  จะตกตะกอนเป็น  $\text{AgOH}$  ที่ pH สูงและ  $\text{CrO}_4^{2-}$  จะถูกเปลี่ยนไปเป็น  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  ที่ pH ต่ำ ดังนั้นจึงไทเทรตที่สภาวะเป็นกลาง ด้วยการหยดฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ลงในสารตัวอย่าง 1 หยด สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีสารละลายตัวอย่าง

2.1 ถ้าเปลี่ยนเป็นสีชมพูแสดงว่าสารละลายมีค่า pH สูงกว่า 7 หรือมีสภาวะเป็นเบสให้เติมกรดกำมะถันที่ละลายจนสารตัวอย่างกลับมาใสเหมือนเดิม

2.2 ถ้าสารตัวอย่างไม่เปลี่ยนสีแสดงว่าสารละลายมีค่า pH ต่ำกว่า 7 หรือมีสภาวะเป็นเบสให้เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายจนกระทั่งสารตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสีชมพู จากนั้นให้ปรับค่า pH กลับเหมือนกับข้อ 2.1

2.3 นำ  $\text{AgNO}_3$  ที่เตรียมไว้เทผ่านกรวยลงในบิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร

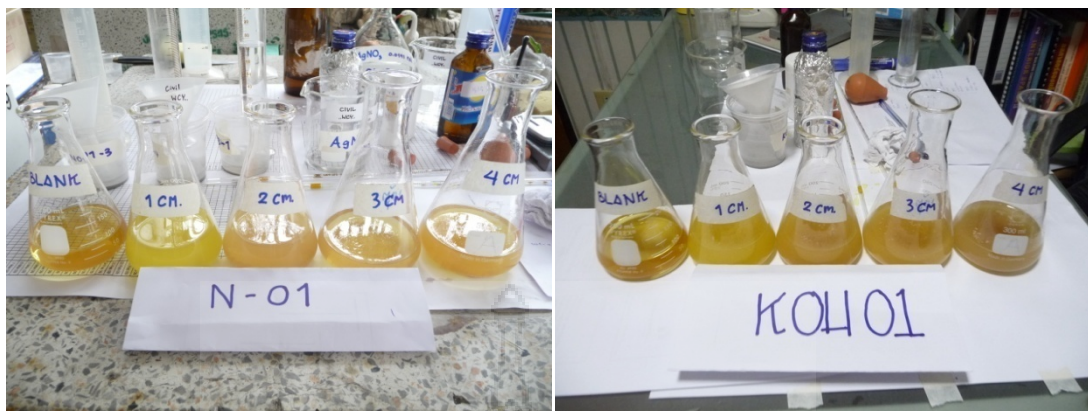
2.4 เติมโปตัสเซียมโครเมตจำนวน 1 มิลลิลิตรที่เตรียมไว้ลงในสารละลายตัวอย่างจะได้สารละลายสีเหลือง

2.5 หยด  $\text{AgNO}_3$  ลงในสารละลายตัวอย่างไปเรื่อยๆ สารละลายตัวอย่างจะเริ่มเปลี่ยนจากสีเหลืองใสเป็นสีเหลืองขุ่นและเริ่มตกตะกอนเป็น  $\text{AgCl}$  จนกระทั่งสารละลายเป็นสีน้ำตาลแดงทั้งหมดถือว่าเป็นจุด End Point อ่านค่าปริมาตรของ  $\text{AgNO}_3$  ที่ใช้ไปและบันทึกปริมาตร

2.6 ทำการหา Blank คือส่วนที่เกินมาของ  $\text{AgNO}_3$  ในปฏิบัติการการตกตะกอน  $\text{AgCl}$  เนื่องจากสารละลายที่เปลี่ยนเป็นตะกอนสีน้ำตาลแดงนั้นคือ  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$  โดยการใช้ น้ำกลั่นในกรณีไทเทรต บันทึกปริมาตรของสารละลาย  $\text{AgNO}_3$  ที่ถูกใช้ไปเป็น Blank



ภาพที่ 3.6 แสดงการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์, การปรับสภาพความเป็นกรดต่างค่า (pH) และการทำ Blank



ภาพที่ 3.7 แสดงตัวอย่างหลังการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย

2.7 ทำการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในสารละลายโดยใช้สมการที่ 6 และบันทึกปริมาณคลอไรด์ในสารละลายตามระดับความลึกต่างของทุกตัวอย่างในการทดลอง

$$\text{mg/l } Cl^- = \frac{(A - B) \times C \times 35400}{\text{ml sample}} \quad (6)$$

โดยที่ A = มิลลิลิตรของ  $AgNO_3$  ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง  
 B = มิลลิลิตรของ  $AgNO_3$  ที่ใช้ในการไทเทรต Blank  
 C = นอร์มัลลิตีของ  $AgNO_3$

3.6.6 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์โดยเครื่อง Chloride Analyzer (Metrohm 781 pH/Ion Meter)

1. นำน้ำปูนตัวอย่าง (เตรียมโดยใช้ผงปูน 4-5 กรัมแช่ทิ้งไว้ในน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 วัน) มากรองด้วยกระดาษกรองลงในขวดรูปกรวยขนาด 250 มิลลิลิตรและวัดปริมาตรของสารละลายที่กรองมาได้ในกระบอกตวง และบันทึกปริมาตรของสารตัวอย่างไว้

2. นำสารละลายที่ทำการกรองแล้ว โดยใช้สารละลายที่ทำการกรองจำนวน 10 มิลลิลิตร โดยผสมกับสารละลายโซเดียมไนเตรต ( $NaNO_3$ ) จำนวน 10 มิลลิลิตร เพื่อกำจัดตัวขัดขวางและแยกไอออนของคลอไรด์ออกมาให้สามารถวัดปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในสารละลายได้อย่างชัดเจนขึ้น

3. ทำการกระตุ้นการทำงานของเครื่อง Chloride ISE ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ( $NaCl$ ) ความเข้มข้น 0.1 โมล ก่อนการไทเทรตเป็นเวลาอย่างน้อย 10 นาทีก่อนการทำหาปริมาณคลอไรด์ไอออนด้วยเครื่อง Chloride Analyzer (Metrohm 781 pH/Ion Meter)

4. ทำการไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์อิสระของตัวอย่างผงคอนกรีตในวันที่ 7, 14, 21 และวันที่ 28 ของการทดสอบซึ่งเป็นวันสุดท้ายในการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อหาปริมาณคลอไรด์เปรียบเทียบกับปริมาณคลอไรด์ก่อนดึงออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี



ภาพที่ 3.8 ตัวอย่างการกรองผงคอนกรีตด้วยเครื่องดูดสุญญากาศและการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการไทเทรต (Titration) หาปริมาณคลอไรด์อิสระ



ภาพที่ 3.9 การกระตุ้นการทำงานของ Chloride ISE ด้วยสารละลายคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร และการหาปริมาณคลอไรด์อิสระด้วยเครื่อง Chloride Analyzer (Metrohm 781 pH/Ion Meter)

## บทที่ 4

### วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดสอบ

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของ การใช้วัสดุปอซโซลานในระบบสามประสานโดยประกอบไปด้วย เถ้าลอย ดินขาว และSilica Powder โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนต่อกำลังและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 350-400 กก./ซม<sup>2</sup> โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) มี 3 ระดับคือ 0.4 ,0.45 และ0.50 และผันแปรปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมด้วยระบบสามประสานของเถ้าลอย ดินขาวและSilica Powder 6 ระดับคือร้อยละ 0, 2.5, 5, 10,15,20 และ 25 โดยน้ำหนักซีเมนต์ ตัวอย่างควบคุม ไม่มีการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลาน สำหรับปริมาณสารลดน้ำพิเศษใช้สำหรับส่วนผสมที่มีการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลาน อายุการบ่มน้ำของคอนกรีต 28 วัน แล้วจึงนำมาทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพเช่นการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C78 ทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 39 และทดสอบกำลังดึงตามมาตรฐาน ASTM C 496 และการทดสอบการเคลื่อนที่ของ Chloride Migration Test และ สำหรับสัญลักษณ์ที่ใช้มีความหมายดังนี้ OPC หมายถึง คอนกรีตธรรมดา OPC/FA20/MK15 หมายถึง ปูนซีเมนต์/เถ้าลอย20%/ดินขาว15% OPC/FA25/MK10 หมายถึง ปูนซีเมนต์/เถ้าลอย25%/ดินขาว10% OPC/FA20/SLP5 หมายถึง ปูนซีเมนต์/เถ้าลอย 20%/ผงซิลิกา 5% OPC/FA25/SLP2.5 หมายถึง หมายถึง ปูนซีเมนต์/เถ้าลอย25%/ผงซิลิกา 2.5% ตัวเลขต่อท้าย หมายถึง ปริมาณวัสดุปอซโซลานเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

### วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดสอบ

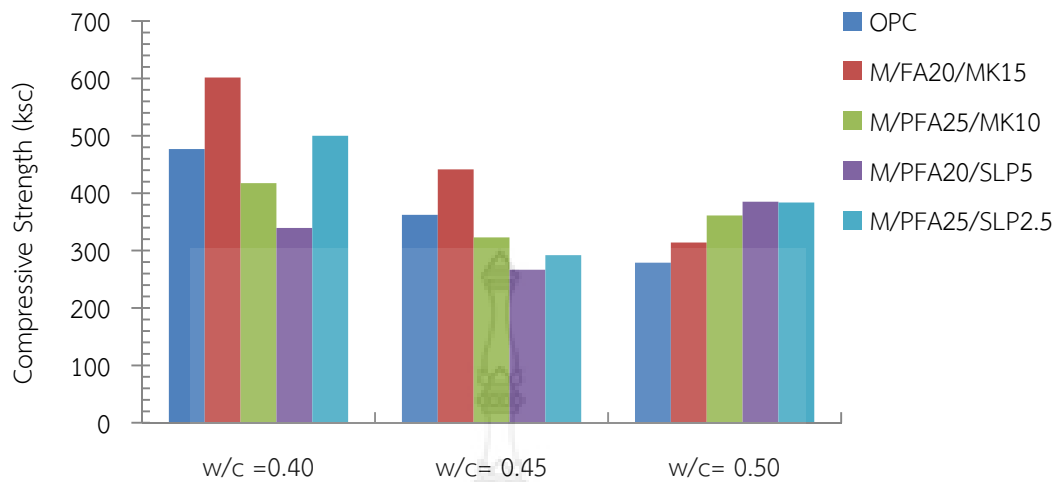
#### 4.1 การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)

การทดสอบกำลังอัดใช้แบบตัวอย่างทดสอบขนาด 10x10x10 เซนติเมตร ภายหลังจากหล่อคอนกรีตทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออกซึ่งตัวอย่างทดสอบที่เตรียมได้ จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปบ่มในสภาวะ บ่มน้ำ 28 วัน จึงทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 ค่า Load-Deflection ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์และคำนวณหาค่ากำลังอัด

ตารางที่ 4.1 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสม เถ้าลอย ดินขาวและผงซิลิกา

Mixed Proportion	Compressive Strength 28 days, ksc		
	w/c =0.40	w/c= 0.45	w/c= 0.50
OPC	477.03	362.35	279.00
M/PFA20/MK15	601.50	441.49	314.03
M/PFA25/MK10	417.50	323.00	361.23
M/PFA20/SLP5	339.35	266.56	385.22
M/PFA25/SLP2.5	500.10	292.12	383.66

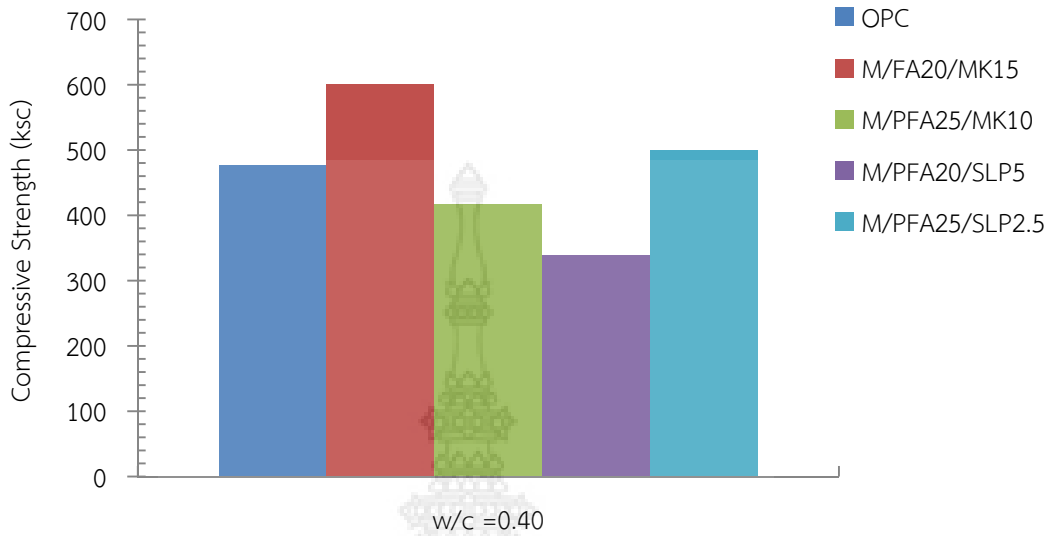




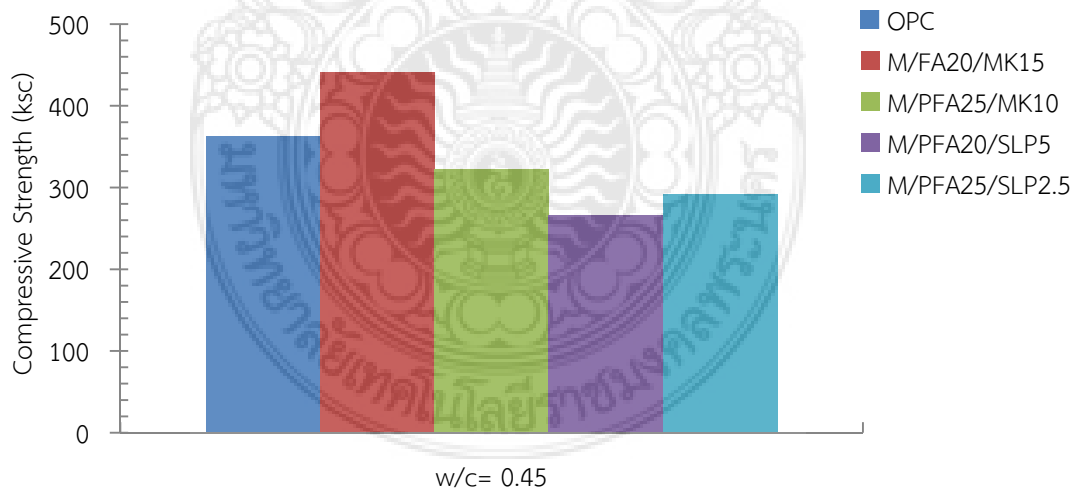
ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่ w/c =0.40, 0.45 และ 0.50

จากภาพที่ 4.1-4.4 พิจารณาการรับกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันพบว่าเมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ w/c =0.40 มีแนวโน้มจะให้ค่ากำลังอัดโดยเฉลี่ยทุกส่วนผสมมีค่ามากกว่าที่ w/c = 0.45 และ 0.50 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาสัดส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากที่สุด ได้แก่ M/PFA20/MK15 (601.5 ksc), M/PFA25/SLP2.5 (500.1 ksc) และ OPC(477 ksc) ตามลำดับ

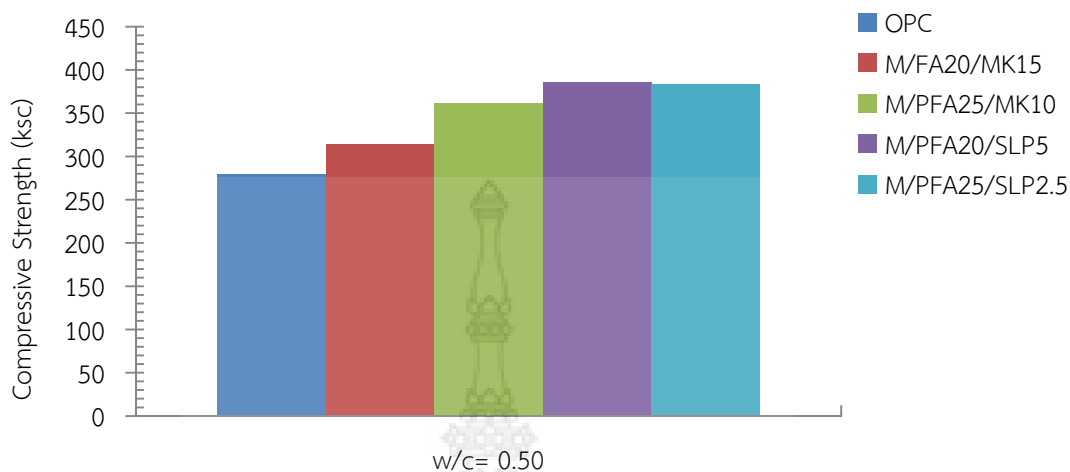
เมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ w/c =0.45 สัดส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากที่สุด ได้แก่ M/PFA20/MK15 (441.49 ksc), OPC (362ksc) และ M/PFA25/MK10(323 ksc) ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ w/c =0.50 สัดส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากที่สุด ได้แก่ M/PFA25/SLP2.5 (383.66 ksc),M/PFA20/SLP5(385ksc) และ M/PFA25/MK10 (361 ksc) ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนของ w/c ที่มีค่าต่ำที่สุดจะให้ค่ากำลังอัดมากที่สุด สำหรับส่วนผสมปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ของ M/PFA20/MK15 และ M/PFA20/SLP5 มีแนวโน้มที่ให้ค่ากำลังอัดมากกว่าทุกสัดส่วนผสม เนื่องจากสาเหตุการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (CSH, CAH) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติด้านกำลังการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และความทนทาน นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตจะอยู่ที่ร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่  $w/c = 0.40$



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่  $w/c = 0.45$



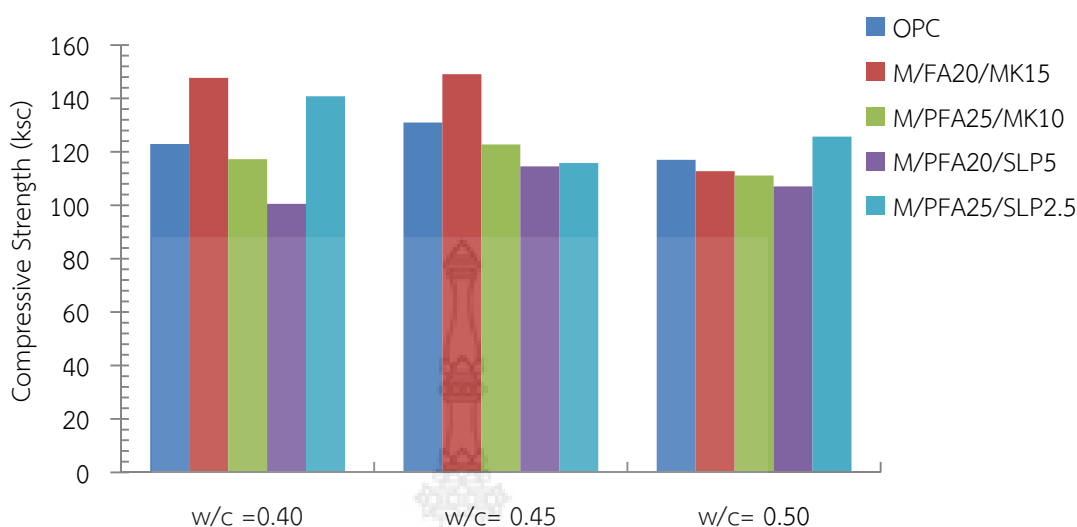
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่ w/c = 0.50

#### 4.2 การทดสอบกำลังดึง (Splitting Tensile Strength)

การทดสอบกำลังดึงใช้ตัวอย่างทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10x20 เซนติเมตร ภายหลังจากหล่อคอนกรีตทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออกซึ่งตัวอย่างทดสอบที่เตรียมได้ จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปบ่มในสภาวะ บ่มน้ำ 28 วัน จึงทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C496 ค่า Load-Deflection ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์และคำนวณหาค่ากำลังดึง

ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตผสม เถ้าลอย ดินขาวและผงซิลิกา

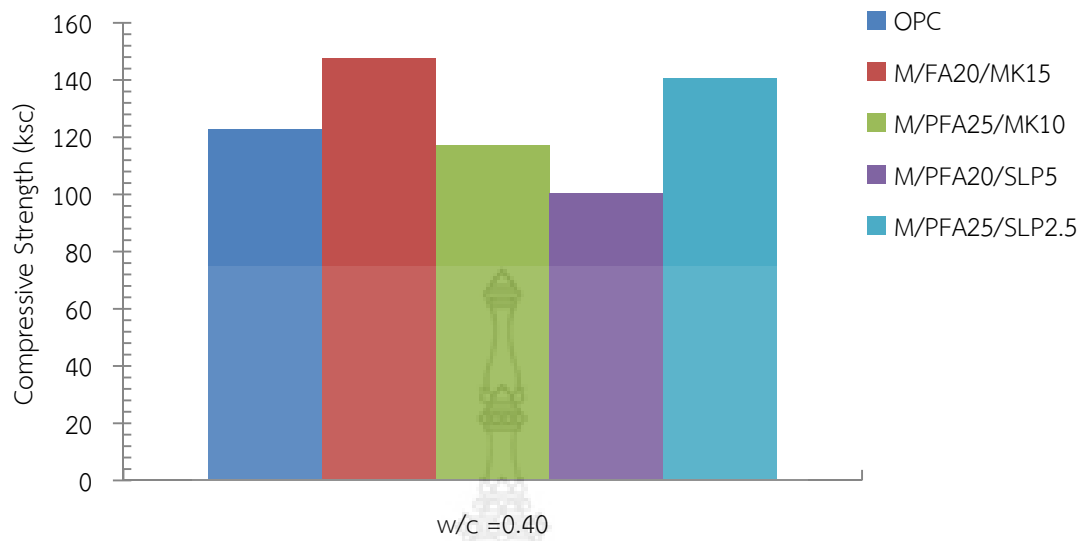
Mixed Proportion	Tensile Strength 28 days, ksc		
	w/c = 0.40	w/c = 0.45	w/c = 0.50
OPC	122.93	130.98	117.00
M/PFA20/MK15	147.69	149.07	112.76
M/PFA25/MK10	117.26	122.76	111.11
M/PFA20/SLP5	100.55	114.58	107.09
M/PFA25/SLP2.5	140.81	115.79	125.70



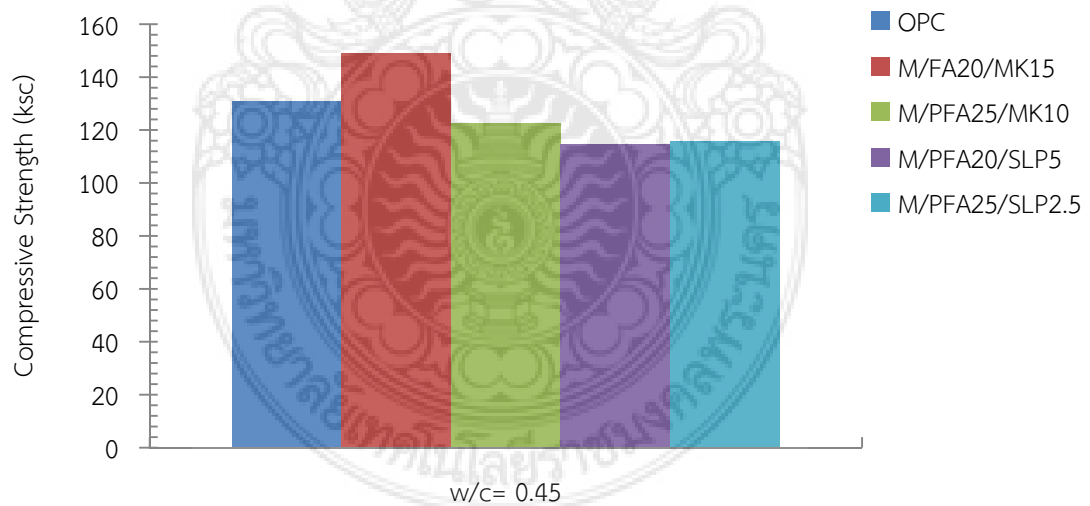
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่ w/c =0.40 ,0.45 และ 0.50

จากภาพที่ 4.5-4.8 พิจารณาการรับกำลังดึงของคอนกรีตที่อายุ 28 วันพบว่าเมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ w/c =0.45 จะมีแนวโน้มให้ค่ากำลังดึงโดยเฉลี่ยทุกส่วนผสมมีค่ามากกว่าที่ w/c = 0.40 และ 0.50 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาสัดส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังดึงเฉลี่ยมากที่สุด ได้แก่ M/PFA20/MK15 ( 149 ksc), OPC(131 ksc) และ M/PFA25/SLP2.5 (116 ksc) ตามลำดับ

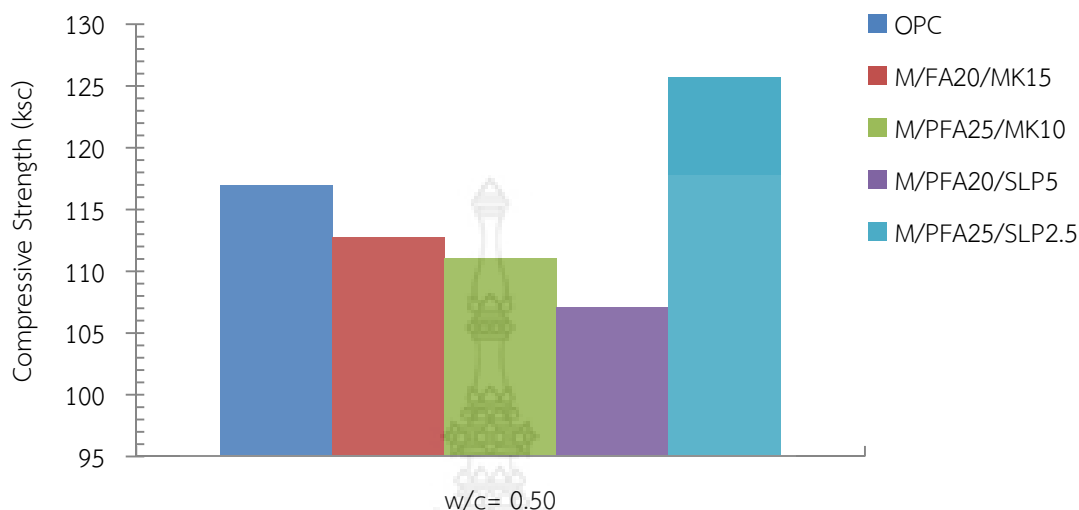
เมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ w/c =0.40 สัดส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังดึงเฉลี่ยมากที่สุด ได้แก่ M/PFA20/MK15 (148 ksc), M/PFA25/SLP2.5 (140 ksc) และ OPC (122 ksc) ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ w/c =0.50 สัดส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังดึงเฉลี่ยมากที่สุด ได้แก่ M/PFA25/SLP2.5 (125 ksc), OPC (117 ksc) และ M/PFA20/MK15 (113 ksc) ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนของ w/c ที่มีค่าต่ำที่สุดมีแนวโน้มจะให้ค่ากำลังดึงมากที่สุด และสำหรับส่วนผสมปอซโซลานใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ M/PFA20/MK15 และ M/PFA25/SLP2.5 มีแนวโน้มที่ให้ค่ากำลังดึง มากกว่าส่วนผสมอื่นๆ เนื่องมาจากสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้คัลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (CSH, CAH) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติด้านกำลังการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และความทนทาน นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีต  
ที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่  $w/c = 0.40$



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีต  
ที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่  $w/c = 0.45$



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่  $w/c = 0.50$

#### 4.3 การทดสอบการรับแรงดัด (Flexural Strength)

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

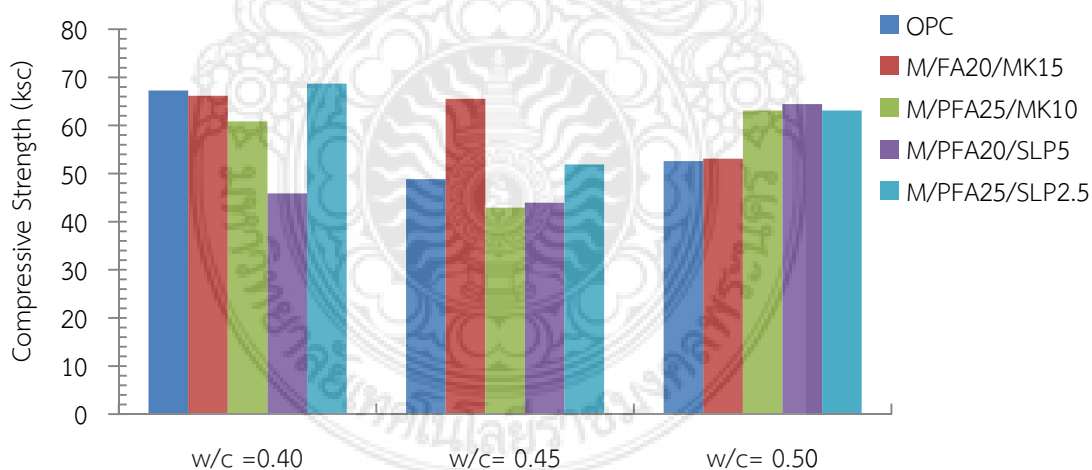
ตารางที่ 4.3 ค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตผสม เถ้าลอย ดินขาวและผงซิลิกา

Mixed Proportion	Flexural Strength 28 days, ksc		
	w/c = 0.40	w/c = 0.45	w/c = 0.50
OPC	67.28	48.83	52.60
M/PFA20/MK15	66.16	65.52	53.11
M/PFA25/MK10	60.86	42.92	63.05
M/PFA20/SLP5	45.87	43.94	64.43
M/PFA25/SLP2.5	68.71	51.89	63.10

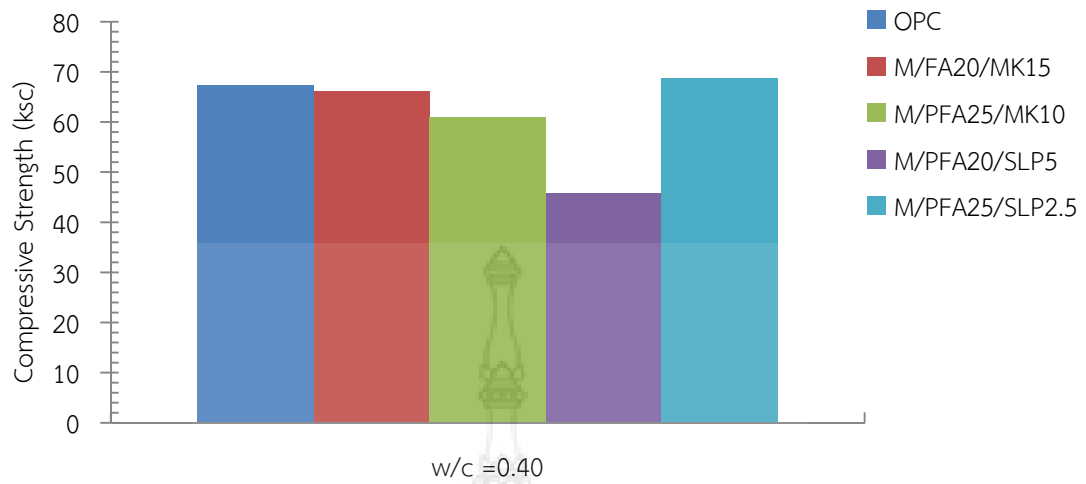
จากภาพที่ 4.9-4.12 พิจารณาการรับกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันพบว่าเมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่  $w/c = 0.40$  มีแนวโน้มให้ค่ากำลังดัดโดยเฉลี่ยทุกส่วนผสมมีค่ามากกว่าที่  $w/c = 0.45$  และ  $0.50$  ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาสัดส่วนที่ให้ค่ากำลังดัดเฉลี่ยมาก

ที่สุด ได้แก่ M/PFA25/SLP2.5 (68.71 ksc), OPC(67.28 ksc) และ M/PFA20/MK15 (66.16 ksc) ตามลำดับ

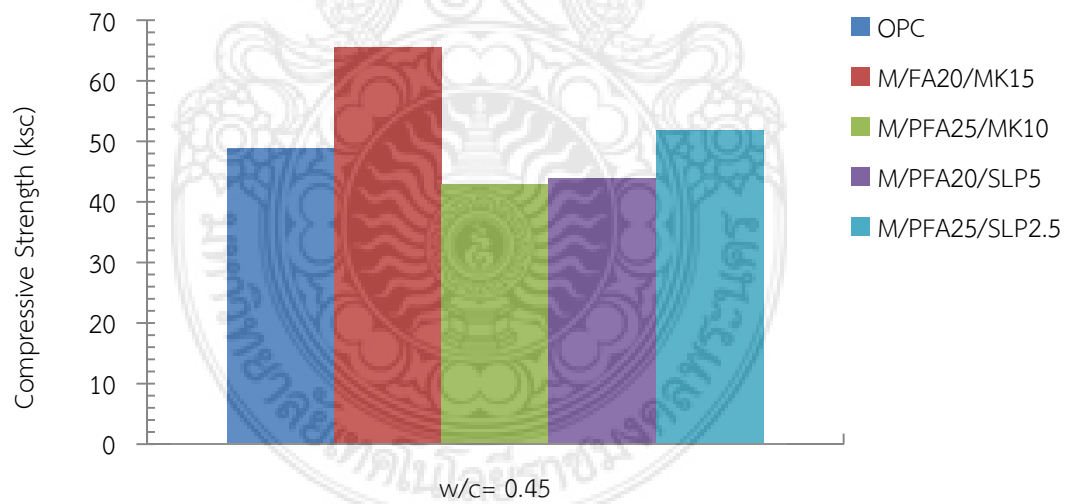
เมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่  $w/c = 0.45$  สัดส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังดัดเฉลี่ยมากที่สุด ได้แก่ M/PFA20/MK15 (65.52 ksc), M/PFA25/SLP2.5 (51.89 ksc) และ OPC(48.83ksc) ตามลำดับและเมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่  $w/c = 0.50$  สัดส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังดัดเฉลี่ยมากที่สุด ได้แก่ M/PFA20/SLP5 (64 ksc), M/PFA25/SLP.5(63ksc) และ M/PFA25/MK10 (63 ksc) ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนของ  $w/c$  ที่มีค่าต่ำที่สุดจะให้ค่ากำลังดัดมากที่สุด สำหรับส่วนผสมปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ของ M/PFA25/SLP2.5 และ M/PFA20/SLP5 มีแนวโน้มที่ให้ค่ากำลังดัดมากกว่าทุกสัดส่วนผสม เนื่องจากสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (CSH, CAH) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติด้านกำลังการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และความทนทาน นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่  $w/c = 0.40$ ,  $0.45$  และ  $0.50$

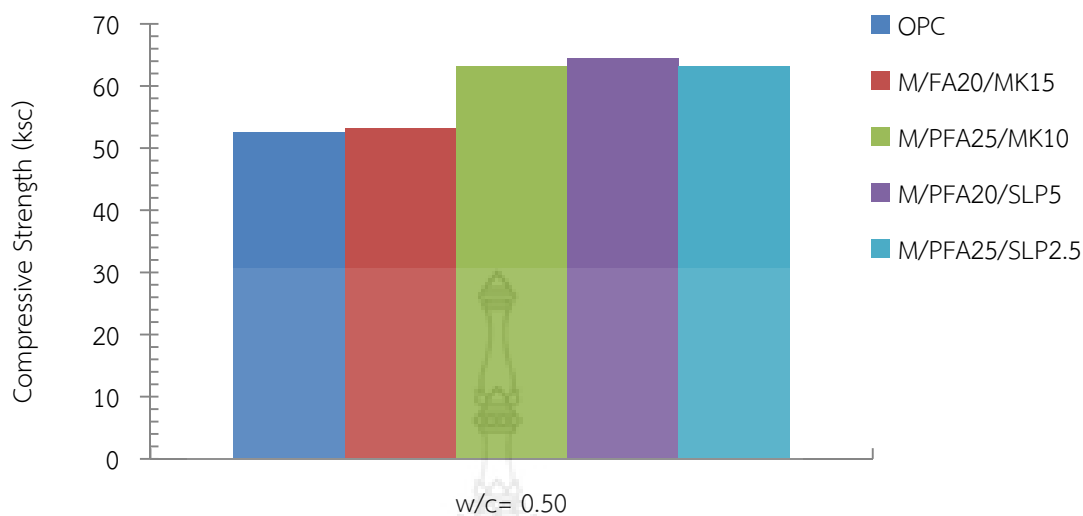


ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีต  
ที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่  $w/c = 0.40$



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีต  
ที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่  $w/c = 0.45$





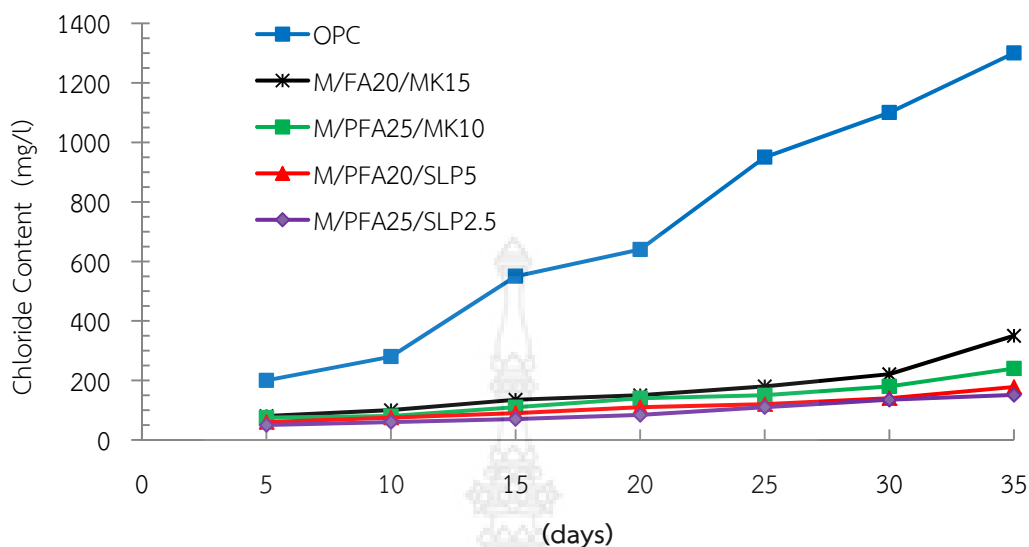
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังตัดของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่  $w/c = 0.50$

#### 4.4 การซึมผ่านของสารละลายในปอซโซลานคอนกรีตด้วยวิธี (Chloride Migration Test)

ทำการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยใช้ปฏิภาคส่วนผสมเดียวกันกับข้างต้นและทำการบ่มคอนกรีตเป็นเวลา 28 วันหลังจากนั้นทำการตัดคอนกรีตด้วยเครื่องตัดคอนกรีตเพื่อทำการทดสอบเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้าโดยวิธี Chloride Migration Test โดยใช้สมการของ Nerst planck (Modified Fick's second law) จากมาตรฐาน JSCE -G571-2003 ทำการแช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจากนั้นทำการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด 12 โวลต์ และทำการหาปริมาณคลอไรด์ไอออนที่อยู่ในสารละลายทุก 5 วันด้วยเครื่อง Chloride Analyzer

ตารางที่ 4.4 ปริมาณคลอไรด์ในสารละลายในปอซโซลานคอนกรีตด้วยวิธี (Chloride Migration Test)

วันที่	ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)				
	OPC	OPC/FA20/MK15	OPC/FA25/MK10	OPC/FA20/SLP5	OPC/FA25/SLP2.5
0	-	-	-	-	-
5	200	80	75	60	50
10	280	100	80	75	60
15	550	135	110	90	70
20	640	150	140	110	84
25	950	180	150	120	110
30	1100	221	180	140	135
35	1300	350	240	178	151



ภาพที่ 4.13 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ของตัวอย่างคอนกรีตในการทดสอบ Chloride Migration Test

จากภาพที่ 4.13 พิจารณาการรับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันพบว่าเมื่อกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่  $w/c = 0.45$  และเมื่อพิจารณาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่มีความต้านทานการซึมผ่านของปริมาณคลอไรด์ที่น้อยที่สุด ในช่วงระหว่างอายุคอนกรีต 5 วัน ถึง 35 วัน ได้แก่ M/PFA25/SLP2.5 (50-151 มิลลิกรัม/ลิตร), M/PFA20/SLP5 (60-178 มิลลิกรัม/ลิตร), M/PFA25/MK10 (75-240 มิลลิกรัม/ลิตร), M/PFA20/MK15 (80-350 มิลลิกรัม/ลิตร), OPC (200-1300 มิลลิกรัม/ลิตร) ตามลำดับ

สามารถสรุปได้ว่าส่วนผสมปอซโซลานที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ของ M/PFA25/SLP2.5 และ M/PFA20/SLP5 มีแนวโน้มในการต้านทานการซึมผ่านของปอซโซลานคอนกรีตมากกว่าทุกสัดส่วนผสม เนื่องจากสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (CSH, CAH) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติด้านกำลังการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และความทนทาน นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณของเถ้าลอย ดินขาว และผงซิลิกาที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 20-25, 15-20 และ 2.5-5 โดยน้ำหนักตามลำดับ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สำหรับเนื้อหาในบทที่ 5 นี้ได้พิจารณาถึง ผลสรุปของการทดลองคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพของคอนกรีตธรรมดา เปรียบเทียบกับปอซโซลานคอนกรีต ทั้งด้านคุณสมบัติเชิงกลและด้านการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตนั้นสามารถสรุปผลการทดลองได้ในครั้งนี้

#### 5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพของปอซโซลานคอนกรีตระบบสามประสาน

##### 5.1.1 การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของปอซโซลานคอนกรีตในระบบสามประสานที่อายุ 28 วันพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำที่สุดคือ  $w/c = 0.40$  มีแนวโน้มให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดมากกว่า  $w/c = 0.40$  และ  $0.50$  ตามลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนผสมของสามประสานที่ใช้เถ้าลอยและดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 20 และ 15 ตามลำดับ ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดมากกว่าส่วนผสมของเถ้าลอยและผงซิลิกาแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 25 และ 2.5 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มของกำลังอัดที่สูงใกล้เคียงกันและมากกว่าส่วนผสมอื่นๆ

ทั้งนี้กำลังอัดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเวลามากขึ้นกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะดีขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมในช่วง 20 ถึง 25% โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นชดเชยปฏิกิริยาของซีเมนต์ที่ถูกเถ้าลอยแทนที่ และสามารถปรับปรุงความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสด และเมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะช่วยปรับปรุงความสามารถในการเทได้เพิ่มขึ้น การที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีกำลังอัดในช่วงอายุต้น ๆ ต่ำ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยไม่เพียงพอที่จะชดเชยกำลังส่วนที่ลดลง เนื่องจากส่วนผสมมีปริมาณซีเมนต์ลดลง แต่เมื่ออายุมากขึ้นการเพิ่มกำลังอัดมีค่ามากขึ้นและอาจสูงกว่าคอนกรีตปกติ นอกจากนั้นดินขาวและผงซิลิกา ยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวและผงซิลิกาจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังอัดและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวและผงซิลิกาที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 10-15 และ 2.5-5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

##### 5.1.2 การทดสอบกำลังดึง (Splitting Tensile Strength)

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของปอซโซลานคอนกรีตในระบบสามประสานที่อายุ 28 วันพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำที่สุดคือ  $w/c = 0.40$  มีแนวโน้มให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดมากกว่า  $w/c = 0.40$  และ  $0.50$  ตามลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนผสมของปอซโซลานคอนกรีตสามประสานที่ใช้เถ้าลอยและดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 20 และ 15 ตามลำดับ ให้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงที่สุด

มากกว่าส่วนผสมของเถ้าลอยและผงซิลิกาแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 25 และ 2.5 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มของกำลังอัดที่สูงใกล้เคียงกันและมากกว่าส่วนผสมอื่นๆ

ทั้งนี้กำลังรับแรงดึงจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเวลามากขึ้น กำลังรับแรงดึงของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะดีขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมในช่วง 20 ถึง 25% โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นชดเชยปฏิกิริยาของซีเมนต์ที่ถูกเถ้าลอยแทนที่ และสามารถปรับปรุงความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสด และเมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะช่วยปรับปรุงความสามารถในการเทได้เพิ่มขึ้น การที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีกำลังรับแรงดึงในช่วงอายุต้น ๆ ต่ำ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นน้อยไม่เพียงพอที่จะชดเชยกำลังส่วนที่ลดลง เนื่องจากส่วนผสมมีปริมาณซีเมนต์ลดน้อยลง แต่เมื่ออายุมากขึ้นการเพิ่มกำลังรับแรงดึงมีค่ามากขึ้นและอาจสูงกว่าคอนกรีตปกติ นอกจากนั้นดินขาวและผงซิลิกา ยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวและผงซิลิกาจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังรับแรงดึงและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวและผงซิลิกาที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 10-15 และ 2.5-5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

### 5.1.3 การทดสอบการรับแรงดัด (Flexural Strength)

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของปอซโซลานคอนกรีตในระบบสามประสานที่อายุ 28 วันพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำที่สุดคือ  $w/c = 0.40$  มีแนวโน้มให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงที่สุดมากกว่า  $w/c = 0.40$  และ 0.50 ตามลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนผสมของปอซโซลานคอนกรีตสามประสานที่ใช้เถ้าลอยและผงซิลิกาแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 25 และ 2.5 ตามลำดับ ให้ค่ากำลังรับแรงรับแรงดัดสูงที่สุดมากกว่าส่วนผสมของเถ้าลอยและดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 15 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มของกำลังดัดให้ค่าสูงใกล้เคียงกันและมากกว่าส่วนผสมอื่นๆ

ทั้งนี้กำลังรับแรงดัดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเวลามากขึ้น กำลังรับแรงดัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะดีขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมในช่วง 20 ถึง 25% โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นชดเชยปฏิกิริยาของซีเมนต์ที่ถูกเถ้าลอยแทนที่ และสามารถปรับปรุงความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสด และเมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะช่วยปรับปรุงความสามารถในการเทได้เพิ่มขึ้น การที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีกำลังรับแรงดัดในช่วงอายุต้น ๆ ต่ำ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นน้อยไม่เพียงพอที่จะชดเชยกำลังส่วนที่ลดลง เนื่องจากส่วนผสมมีปริมาณซีเมนต์ลดน้อยลง แต่เมื่ออายุมากขึ้นการเพิ่มกำลังรับแรงดัดมีค่ามากขึ้นและอาจสูงกว่าคอนกรีตปกติ นอกจากนั้นดินขาวและผงซิลิกา ยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวและผงซิลิกาจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังรับแรงดัดและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวและผงซิลิกาที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 10-15 และ 2.5-5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

## 5.2 การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในปอซโซลานคอนกรีตระบบสามประสาน

จากผลการทดสอบการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในปอซโซลานคอนกรีตระบบสามประสานที่อายุต่างๆเริ่มที่ 5 วันจนถึง 35 วัน โดยพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำที่สุดคือ  $w/c = 0.40$  พบว่า ส่วนผสมของปอซโซลานคอนกรีตสามประสานที่ใช้เถ้าลอยและผงซิลิกาแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 25 และ 2.5 ตามลำดับ ให้ค่าการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์สูงที่สุดมากกว่าส่วนผสมของเถ้าลอยและผงซิลิกาแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 5 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มของการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ใกล้เคียงกันและมากกว่าส่วนผสมอื่นๆ

ทั้งนี้การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะดีขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมในช่วง 20 ถึง 25% โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นชดเชยปฏิกิริยาของซีเมนต์ที่ถูกเถ้าลอยแทนที่ และสามารถปรับปรุงความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสด และเมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะช่วยปรับปรุงความสามารถในการเทได้เพิ่มขึ้น การที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในช่วงอายุต้น ๆ ต่ำ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นน้อยไม่เพียงพอที่จะชดเชยกำลังส่วนที่ลดลง เนื่องจากส่วนผสมมีปริมาณซีเมนต์ลดน้อยลง แต่เมื่ออายุมากขึ้น การเพิ่มการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์มีค่ามากขึ้นและอาจสูงกว่าคอนกรีตปกติ นอกจากนั้นดินขาวและผงซิลิกา ยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวและผงซิลิกาจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์และความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวและผงซิลิกาที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 10-15 และ 2.5-5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาและทดสอบทางด้านคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพโดยใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนคอนกรีตในระบบสามประสาน นี้ผลที่ได้เป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับแนวทางการนำวัสดุพอลิโพรพิลีนคอนกรีต ระบบสามประสานมาใช้ในงานคอนกรีตโครงสร้างที่ต้องรับแรงกระทำต่างๆ และช่วยลดต้นทุนในการผลิตปูนซีเมนต์ซึ่งต้องใช้พลังงานในการผลิตเป็นอย่างมากก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมหรือภาวะเรือนกระจก (Green house effect) ทั้งนี้เป็นการนำเอาวัสดุที่เหลือทิ้งนำกลับมาใช้ใหม่ โดยแนวทางการนำวัสดุพอลิโพรพิลีนมาใช้เป็นส่วนผสมในงานคอนกรีตในด้านความคงทนขอเสนอแนวทางไว้สำหรับผู้สนใจทำการศึกษาเพิ่มเติม เช่น ความต้านทานการสึกหรอ การต้านทานการเสียดสี การต้านทานต่อการกัดกร่อนโดยกรดซัลฟิวริก และอื่นๆ



## บรรณานุกรม

1. กัญญา ตระกูลคู. 2534. เทคโนโลยีการกักกร่อน. พิมพ์ครั้งที่ 2. ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็กซ์เพรส มีเดีย กรุงเทพฯ
2. คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2543. ความคงทนของคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัทจุดทอง จำกัด, กรุงเทพฯ
3. ชัยยุทธ ช่างสาร และ เลิศณรงค์ ศรีพนม. 2543. เคมีประยุกต์. บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ
4. นันทชัย สกานูพงษ์ และ ศิวกรณ์ ก้องเอกภพ. 2550. การศึกษาเชิงปฏิบัติการของการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี. โครงการงานวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
5. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2543. ความคงทนของคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท จุดทอง จำกัด, กรุงเทพฯ
5. ปิติ สุขนครสุขกุล. คอนกรีตขั้นพื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ศูนย์ผลิตตำราเรียน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549.
6. บัญชา สุปรินายก และคณะ. พฤติกรรมของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กและเส้นใยโพลีโพรพิลีน, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2542.
7. พิชัย เลี่ยมพิพัฒน์. พลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 14. กรุงเทพฯ : ห.จ.ก.ป.สัมพันธ์พาณิชย์, 2540.
8. วันชัย ยอดสุดใจ. 2548. การลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี. โยธาสาร: 49-51
9. วรเดช สีดา, การศึกษาความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง, วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546.
11. จิรวัดน์ สุวรรณพฤษ, ผลของดินขาวต่อกำลังและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546.
12. ASTM DESIGNATION : C78-94, Standard Test Method for Flexural Strength of B. Elsener and U.Angst. 2007. Mechanism of Electrochemical Chloride Removal.
13. ASTM DESIGNATION : C1018-97: Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading).
14. 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
15. 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
16. P.F. Megrath and R.D. Hooton. 1996. Influence of Voltage on Chloride Diffusion Coefficients from Chloride Migration Tests. *Cement and Concrete Research*. Elsevier
  17. 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
  18. 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
  19. S. Mindess, J.F. Young and D. Darwin. 2003. *Concrete*. Prentice Hall, Inc., New Jersey
  20. A. Lau and M. Anson. "Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete." *Journal of Cement and Concrete Research*. 36 (2006) : 1698-1707.
  21. Gerodo 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
  22. A.M. Hassanein, G.K. Glass, N.R. Buenfeld. 2002. Protection Current Distribution in Reinforced Concrete Cathodic Protection Systems. **Cement and Concrete Research**. Elsevier Ltd. *Cement and Concrete Research* 24: 159-167
  23. B. Elsener. 2001. Half-cell Potential Mapping to Assess Repair Work on RC Structure. **Construction and Building Materials**. Elsevier Ltd. Vol. 15: 133-139
  24. B. Elsener and U. Angst. 2007. Mechanism of Electrochemical Chloride Removal. **Corrosion Science**. Elsevier Ltd. *Corrosion Science* 49: 4504-4522
  25. CPAC. 2008. CPAC Marine Concrete. Available Source: <http://www.cpac.co.th/techno/marine/marine.html>, 2008
  26. C. Arya, Q. Sa'id-Shawqi and P.R.W. Vassie. 1996. Factors Influencing Electrochemical Removal of Chloride from Concrete. **Cement and Concrete Research**. Elsevier Ltd. *Cement and Concrete Research* 26 No. 6: 851-860



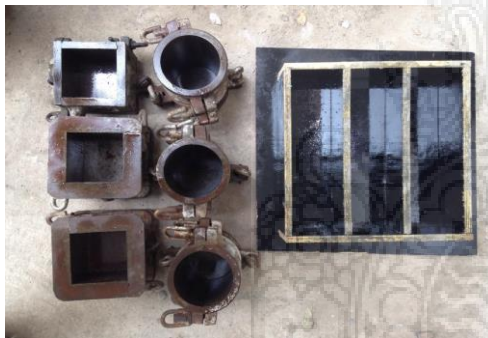
ภาคผนวก ก

วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง





เครื่องทดสอบกำลังตัดและกำลังอัดของคอนกรีต





การทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้า (Chloride Migration Test)



ตัดตัวอย่างคอนกรีตความหนา 1 นิ้วและทำการอุดรอยร้าวด้วยซิลิโคน



นำตัวอย่างไปประกอบในอุปกรณ์ในการทดลองที่เตรียมไว้และทำการเติมสารละลายในท่ออะคลิลิกและทำการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 15 โวลต์

## ภาคผนวก ข

การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ การหาปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย  
และการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ (Chloride Migration Test)



## การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กในการทดสอบ



การเตรียมส่วนผสมโดยเตรียมตามน้ำหนักตามปฏิภาคส่วนผสมที่กำหนดไว้



การผสมคอนกรีตตามส่วนผสมที่ชั่งน้ำหนักไว้แล้ว



การผสมคอนกรีตและการทดสอบค่าการยุบของคอนกรีต



ภาคผนวก ค





ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบกำลังอัด w/c =0.40

Compressive strength						
Specimen	Weigth (kg)	Load (kn)	Avg. Load (kn)	Area	Strength (ksc)	Avg.Strength (ksc)
OPC	2.45	122	447.03	100	121.1	447.03
	2.40	123.2		100	122.4	
	2.40	124.4		100	121.3	
M/FA20/MK15	2.35	145.2	601.50	100	147.2	601.50
	2.40	148.3		100	146.5	
	2.35	147.5		100	147.2	
M/FA25/MK10	2.40	117.5	417.50	100	117.1	417.50
	2.40	118.5		100	117.4	
	2.40	117.6		100	117.23	
M/FA20/SLP5	2.30	100.2	339.35	100	100.1	339.35
	2.35	101.2		100	101.5	
	2.35	111.5		100	102.5	
M/FA25/SLP2.5	2.35	142.5	500.10	100	141.2	500.10
	2.30	141.2		100	140.7	
	2.35	140.2		100	141.8	

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบกำลังอัด w/c =0.45

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	
M/FA20/MK15	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	
M/FA25/MK10	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	
M/FA20/SLP5	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	
M/FA25/SLP2.5	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	

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบกำลังอัด w/c =0.50

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	
M/FA20/MK15	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	
M/FA25/MK10	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	
M/FA20/SLP5	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	
M/FA25/SLP2.5	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	

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบกำลังดึง w/c =0.40

tensile strength						
Specimen	Weigth (kg)	Load (kn)	Avg. Load (kn)	Area	Strength (ksc)	Avg.Strength (ksc)
OPC	2.45	122	124.2	100	121.1	122.93
	2.40	123.2		100	122.4	
	2.40	124.4		100	121.3	
M/FA20/MK15	2.35	145.2	148.5	100	147.2	147.69
	2.40	148.3		100	146.5	
	2.35	147.5		100	147.2	
M/FA25/MK10	2.40	117.5	117.5	100	117.1	117.26
	2.40	118.5		100	117.4	
	2.40	117.6		100	117.23	
M/FA20/SLP5	2.30	100.2	104.5	100	100.1	100.55
	2.35	101.2		100	101.5	
	2.35	111.5		100	102.5	
M/FA25/SLP2.5	2.35	142.5	140.5	100	141.2	140.81
	2.30	141.2		100	140.7	
	2.35	140.2		100	141.8	

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบกำลังดึง w/c =0.45

tensile strength						
Specimen	Weigth (kg)	Load (kn)	Avg. Load (kn)	Area	Strength (ksc)	Avg.Strength (ksc)
OPC	2.45	122	124.2	100	121.1	122.93
	2.40	123.2		100	122.4	
	2.40	124.4		100	121.3	
M/FA20/MK15	2.35	145.2	148.5	100	147.2	147.69
	2.40	148.3		100	146.5	
	2.35	147.5		100	147.2	
M/FA25/MK10	2.40	117.5	117.5	100	117.1	117.26
	2.40	118.5		100	117.4	
	2.40	117.6		100	117.23	
M/FA20/SLP5	2.30	100.2	104.5	100	100.1	100.55
	2.35	101.2		100	101.5	
	2.35	111.5		100	102.5	
M/FA25/SLP2.5	2.35	142.5	140.5	100	141.2	140.81
	2.30	141.2		100	140.7	
	2.35	140.2		100	141.8	

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบกำลังดึง w/c =0.50

tensile strength						
Specimen	Weigth (kg)	Load (kn)	Avg. Load (kn)	Area	Strength (ksc)	Avg.Strength (ksc)
OPC	2.45	122	124.2	100	121.1	122.93
	2.40	123.2		100	122.4	
	2.40	124.4		100	121.3	
M/FA20/MK15	2.35	145.2	148.5	100	147.2	147.69
	2.40	148.3		100	146.5	
	2.35	147.5		100	147.2	
M/FA25/MK10	2.40	117.5	117.5	100	117.1	117.26
	2.40	118.5		100	117.4	
	2.40	117.6		100	117.23	
M/FA20/SLP5	2.30	100.2	104.5	100	100.1	100.55
	2.35	101.2		100	101.5	
	2.35	111.5		100	102.5	
M/FA25/SLP2.5	2.35	142.5	140.5	100	141.2	140.81
	2.30	141.2		100	140.7	
	2.35	140.2		100	141.8	

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบกำลังดัด w/c =0.40

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	
M/FA20/MK15	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	
M/FA25/MK10	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	
M/FA20/SLP5	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	
M/FA25/SLP2.5	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	

ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบกำลังดัด w/c =0.45

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	
M/FA20/MK15	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	
M/FA25/MK10	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	
M/FA20/SLP5	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	
M/FA25/SLP2.5	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	

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบกำลังดัด w/c =0.50

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	
M/FA20/MK15	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	
M/FA25/MK10	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	
M/FA20/SLP5	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	
M/FA25/SLP2.5	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	

ตารางที่ ค.10 ผลการทดสอบการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์

ชนิดของวัสดุ	ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ (mg/l)						
	5 วัน	10 วัน	15 วัน	20 วัน	25 วัน	30 วัน	35 วัน
OPC	200	280	550	640	950	1100	1300
M/FA20/MK15	80	100	135	150	180	221	350
M/FA25/MK10	75	80	110	140	150	180	240
M/FA20/SLP5	60	75	90	110	120	140	178
M/FA25/SLP2.5	50	60	70	84	110	135	151