



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

### โครงการวิจัยเรื่อง

ความคงทนและโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อม  
ทะเล เป็นเวลา 15 ปี

(Durability and microstructure of fly ash concrete under 15-year exposure in  
marine site)

### หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณ  
แผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 170298

สัญญาเลขที่ 98/2558

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

ความคงทนและโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อม

ทะเล เป็นเวลา 15 ปี

(Durability and microstructure of fly ash concrete under 15-year exposure in  
marine site)

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาติ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ธันวาคม 2558

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558  
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “ความคงทนและโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 15 ปี” จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มีงบประมาณทั้งโครงการ 661,000 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ	:	นายวิเชียร ชาลี
หน่วยงาน	:	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ	:	12 เดือน
งบประมาณ	:	661,000 บาท

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์และการกักกร่อนเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสภาวะน้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี โดยใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 0.55 และ 0.65 แต่ละอัตราส่วนวัสดุประสานแทนที่เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างคอนกรีตมีขนาดเป็น 200 x 200 x 250 มม.<sup>3</sup> มีการฝังเหล็กที่ตำแหน่งมุมที่ระยะหุ้ม 95 มิลลิเมตร หลังการบ่มคอนกรีตเป็นเวลา 28 วัน นำคอนกรีตไปแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล ได้เก็บตัวอย่างคอนกรีตจากน้ำทะเลมาเจาะทดสอบกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์ (ที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝัง) และการกักกร่อนเหล็กหลังอายุแช่น้ำทะเล 15 ปี ผลการศึกษา พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้การสูญเสียกำลังอัด การกักกร่อนเหล็กเสริม การแทรกซึมของคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งฝังเหล็ก ในคอนกรีตลดลง การใช้เถ้าถ่านหินในคอนกรีตที่มี W/B เท่ากับ 0.45 ในช่วงร้อยละ 15 ถึง 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถเพิ่มความคงทนให้กับคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : เถ้าถ่านหิน, กำลังอัด, การแทรกซึมของคลอไรด์, การกักกร่อนเหล็กเสริม, สภาวะแวดล้อมทะเล

## Abstract

In this study, the compressive strength, chloride penetration and steel corrosion of fly ash concrete under 15-year exposure in marine environment were investigated. Water to binder ratio of concretes was varied as 0.45, 0.55 and 0.65. The fly ash from Mae Moh power plant were used to replace Portland cement type I at the percentages of 0, 15, 25, 35 and 50 by weight of binder at each W/B ratio. The 200x200x250 mm<sup>3</sup> concrete specimens were cast and steel bar with 12 mm in diameter and 50 mm in length were embedded at the covering depth 95 mm. Concrete specimen were cured in fresh water for 28 days, then were placed at tidal zone of sea water. The specimen were test for compressive strength, chloride penetration, chloride content (at the position of embedded steel bar) and steel corrosion after being exposed to tidal zone of sea water for 15 years. The results showed that the increase of fly ash replacement in concrete clearly reduced the compressive strength loss, chloride penetration, steel corrosion and chloride content at the position of embedded steel bar in concrete. This study, concretes with the fly ash replacement of 15 to 35% by weight of binder with a W/B ratio of 0.45 can be efficiently employed to enhance the durability of concrete structures in seawater.

**Keywords:** Fly ash, Compressive strength, Chloride penetration, Steel corrosion, Marine environment.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 98/2558

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้ จะเป็นฐานข้อมูลเพื่อนำไปใช้แก้ปัญหาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลประเทศไทย ให้มีความคงทนมากขึ้น ภายใต้อิทธิพลของแรงและความประหัดตามหลักวิศวกรรม ตลอดจนช่วยเสริมสร้างความรู้ ความเข้าใจ เพื่อส่งเสริมการใช้ถ้ำถ้ำหินในงานคอนกรีตที่ต้องการก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเลได้เป็นอย่างดี

## สารบัญ

### สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญเนื้อหา	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 กลไกการทำลายของโครงสร้างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล	4
2.2 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์	6
2.3 การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต	13
2.4 วัสดุปอชโซลาน	17
2.5 ปฏิกริยาปอชโซลาน	18
2.6 เถ้าถ่านหิน	18
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
<b>บทที่ 3 วิธีการศึกษา</b>	<b>29</b>
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	29
3.2 อุปกรณ์การทดสอบและเครื่องมือ	29

3.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบเมื่อ 15 ปีที่แล้ว	32
3.4 วิธีการศึกษา	35
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล</b>	<b>41</b>
4.1 สมบัติของวัสดุประสาน	41
4.2 สมบัติของน้ำทะเล	45
4.3 ลักษณะของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล	46
4.4 การสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตเนื่องจากน้ำทะเล	47
4.5 ผลของเถาถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล	49
4.6 ปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต	50
4.7 การกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต	52
4.8 การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีต	54
4.9 ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในน้ำทะเล เป็นระยะเวลา 15 ปี	64
4.10 โครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี	68
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>70</b>
5.1 สรุปผล	70
5.2 ข้อเสนอแนะ	71
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>72</b>
<b>ภาคผนวก ก ผลผลิต (Output)</b>	<b>75</b>
<b>ภาคผนวก ข รายงานการเงิน</b>	<b>82</b>
<b>ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย</b>	<b>84</b>



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณสูงสุดของคลอรีนเพื่อป้องกันการเกิดสนิม	9
3.1 อัตราส่วนผสมคอนกรีต	33
4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของวัสดุประสาน	43
4.2 องค์กรประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน	44
4.3 สมบัติของมวลรวม	45
4.4 สมบัติของน้ำทะเล	46
4.5 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมแก้้ถ่านหินที่แช่ในน้ำทะเลในสภาพเปียก สลับแห้ง เป็นเวลา 15 ปี	48
4.6 ความสามารถในการกักเก็บคลอรีนของคอนกรีตที่ผสมแก้้ถ่านหินหลังแช่น้ำทะเล เป็นระยะเวลา 15 ปี	65

## สารบัญรูปรภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ชนิดของสิ่งแวดลอมทะเล	5
2.2 ความเสียหายของคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์	6
2.3 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต	7
2.4 ลักษณะการทำลายของสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีต	14
2.5 รูปขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะที่ได้จากการเผาแบบ Pulverized Coal	19
2.6 รูปขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบ Fluidized-bed	20
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบ	32
3.2 สถานที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี	34
3.3 การเจาะตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์	35
3.4 การตัดตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์	36
3.5 ตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต	36
3.6 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุแช่น้ำทะเล 15 ปี	39
3.7 การทดสอบการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี	40
4.1 ภาพถ่ายขยายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	41
4.2 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ	42
4.3 ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลบแห้งเป็นเวลา 15 ปี	47
4.4 ร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลที่อายุ 15 ปี เทียบกับกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน	49
4.5 ผลของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลบแห้งเป็นเวลา 15 ปี	50
4.6 ผลของเถ้าถ่านหินต่อปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลบแห้งเป็นเวลา 15 ปี	52
4.7 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลบแห้งเป็นเวลา 15 ปี	52

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 การกักร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้ม 95 มม. หลังจากแช่น้ำทะเล ในสถานะเปียกสลับแห้งเป็นระยะเวลา 15 ปี	54
4.9 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดใน คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเล 15 ปี	59
4.10 ผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลัง แช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี	61
4.11 ผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมคลอไรด์ที่ความลึกต่างๆในคอนกรีตที่ผสม เถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี	64
4.12 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี	66
4.13 ผลของเถ้าถ่านหินต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสม เถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี	67
4.14 ภาพขยาย SEM ของคอนกรีตที่มี W/B= 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี	69

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างของคอนกรีตในน้ำทะเลและบริเวณชายฝั่งเป็นส่วนที่ต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่แปรปรวนส่งผลให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นสูง ไม่ว่าจะเป็นการกัดกร่อนเนื่องจากสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เช่น แรงกระแทกจากคลื่น ทราบ กรวดโดยตรง หรือการกัดกร่อนที่เกิดจากสารประกอบเคมีซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำทะเล การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณจะมีความรุนแรงที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในน้ำทะเลและสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เช่น ความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ตลอดจนสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการกัดกร่อนทางเคมีต่อ โครงสร้างคอนกรีต การเลือกคอนกรีตที่ต้องการใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเล จำเป็นต้องใช้คอนกรีตที่มีความคงทนควบคุมการรับแรงเชิงกลที่ดี ซึ่งการศึกษาถึงกลไกการทำลายทางปฏิกิริยาเคมีของสารเคมีที่อยู่ในน้ำทะเลที่เป็นอันตรายกับคอนกรีต เป็นสิ่งสำคัญต่อการเลือกส่วนผสมของวัสดุประสานเพื่อให้สามารถต้านทานต่อการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล โดยการศึกษาเกี่ยวกับความคงทนของคอนกรีตในงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นที่ยอมรับว่า ถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานที่สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน แล้วทำให้คอนกรีตมีสมบัติด้านความคงทนที่ดีขึ้น (Chalee et al., 2010 ; Cheewaket et al., 2012; Chindaprasirt et al., 2005 ; Thomas and Matthews, 2004) เช่น ป้องกันการทำลายเนื่องจากสารละลายซัลเฟตได้ดี คอนกรีตมีความทึบน้ำสามารถป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปทำความเสียหายให้กับเหล็กเสริมได้ ตลอดจนปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในช่วงหลัง ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตมีการพัฒนาต่อเนื่องและลดการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงเป็นต้น อย่างไรก็ตามการศึกษาส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การศึกษาในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสามารถทำได้สะดวก รวดเร็วและควบคุมตัวแปรในการศึกษาได้ง่าย แต่ผลการศึกษาอาจไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมของการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมทะเลจริง ซึ่งมีปัจจัยอื่นที่เกื้อหนุนให้มีการกัดกร่อนที่รุนแรงมากขึ้น ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการเก็บข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเลจริง เช่น Thomas และคณะ (2004) ได้ทำการทดสอบโดยหล่อคอนกรีตซึ่งฝังแท่งเหล็กไว้ภายใน โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านหินปริมาณร้อยละ 0 ถึง 50 จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่น้ำทะเลในประเทศอังกฤษซึ่งเป็นเขตอบอุ่นเป็นระยะเวลาถึง 10 ปี ผลปรากฏว่า อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กเสริมมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มเริ่มต้น แต่เมื่อแช่น้ำทะเลนานขึ้น จะมีผลไม่แตกต่างกัน อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์และการสูญเสียน้ำหนักเหล็กเสริมเนื่องจากการกัดกร่อนในคอนกรีตผสมถ่านหินมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา และยังลดลงเมื่อเพิ่ม

ปริมาณเถ้านหินมากขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินร้อยละ 30 และ 50 มีค่าลดต่ำลงในช่วงระยะเวลาการแช่น้ำทะเล 2 ถึง 10 ปี เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนการศึกษาความคงทนของคอนกรีตในเขตทะเลที่อยู่ในประเทศไทย ซึ่งเป็นเขตร้อนชื้น Chalee และคณะ (2010) ได้เก็บข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินในน้ำทะเลถึง 10 ปี ซึ่งพบว่า ผลการศึกษามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับข้อมูลด้านความคงทนที่ศึกษาในสิ่งแวดล้อมทะเลที่เป็นเขตอบอุ่น โดยการใช้เถ้านหินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีความคงทนเนื่องจากน้ำทะเลมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การศึกษาสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ต้องการก่อสร้างในสภาพแวดล้อมทะเลจริง จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลที่ยาวนานที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับอายุการใช้งานจริงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และเป็นการเพิ่มความมั่นใจในการนำผลการศึกษาไปใช้งานได้อย่างมั่นใจและน่าเชื่อถือมากขึ้น ซึ่งระยะเวลาที่โครงสร้างคอนกรีตอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่นานขึ้น อาจส่งผลต่อกลไกการทำลายที่แตกต่างจากช่วงอายุต้นๆ ได้ นอกจากนั้นการศึกษาเชิงลึกถึงระดับโครงสร้างทางจุลภาค (microstructure) ของคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเลเป็นระยะเวลานาน จะทำให้เข้าใจถึงกลไกการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ชัดเจนมากขึ้น ซึ่งจะได้ข้อมูลกลไกการกัดกร่อนเชิงลึก ที่เป็นพื้นฐานสำหรับการศึกษาหาวัสดุประสานชนิดใหม่ เพื่อใช้ในการป้องกันการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล ต่อ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กต่อไป ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่แช่บริเวณชายฝั่งทะเลซึ่งสัมผัสกับสภาวะเปียกสลับแห้งนานถึง 15 ปี โดยมุ่งเน้นไปที่ผลของระดับกำลังอัด (compressive strength grade) และปริมาณการแทนที่เถ้านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อ กำลังอัดคอนกรีต การแทรกซึมของคลอไรด์ และการกัดกร่อนเหล็กเสริม โดยศึกษาผลการทำลายควบคู่กับโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีต ที่ทดสอบด้วยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX) ทั้งนี้เพื่อให้ได้ข้อมูลด้านความคงทนและกลไกการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเลภายใต้ระยะเวลาที่คอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเลนานถึง 15 ปี

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของระดับกำลังอัดของคอนกรีต ต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทรกซึมของคลอไรด์ และการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 15 ปี

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของปริมาณการแทนที่เถ้านหิน ต่อกำลังอัดคอนกรีต การแทรกซึมของคลอไรด์ และการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 15 ปี

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของระดับกำลังอัดของคอนกรีตและปริมาณการแทนที่เถ้านหิน ต่อ โครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของเถ้าถ่านหินและระดับกำลังอัดของคอนกรีตปกติต่อ กำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ การกัดกร่อนเหล็กเสริม และโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี โดยตัวอย่างคอนกรีตที่ทำวิจัยที่เตรียมเมื่อ 15 ปีที่แล้ว มีกำลังอัดของคอนกรีตปกติ (คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) ทั้งหมด 3 ระดับ ตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45 0.55 และ 0.65 ใช้เถ้าถ่านหินจากแม่เกาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x250 มม<sup>3</sup> และฝังเหล็ก RB 12 ที่ตำแหน่งมุมของก้อนตัวอย่างที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10 20 50 และ 90 มม. และนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบเจาะทดสอบกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ การกัดกร่อนของเหล็กเสริมและโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX) ที่อายุหลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 15 ปี

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1) นำเสนอฐานข้อมูลที่ใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล ซึ่งเป็นข้อมูลที่สอดคล้องกับการใช้งานจริง มีความชัดเจนและครอบคลุม เพื่อใช้ประกอบการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งจะเป็นการส่งเสริมการใช้เถ้าถ่านหินซึ่งเป็นวัสดุที่มีในประเทศให้เกิดประโยชน์ และมีประสิทธิภาพสูง ภายใต้งบประมาณตามหลักวิศวกรรม

1.4.2) นำเสนอข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลานาน เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาวิธีการป้องกันการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลโดยวิธีอื่นต่อไป

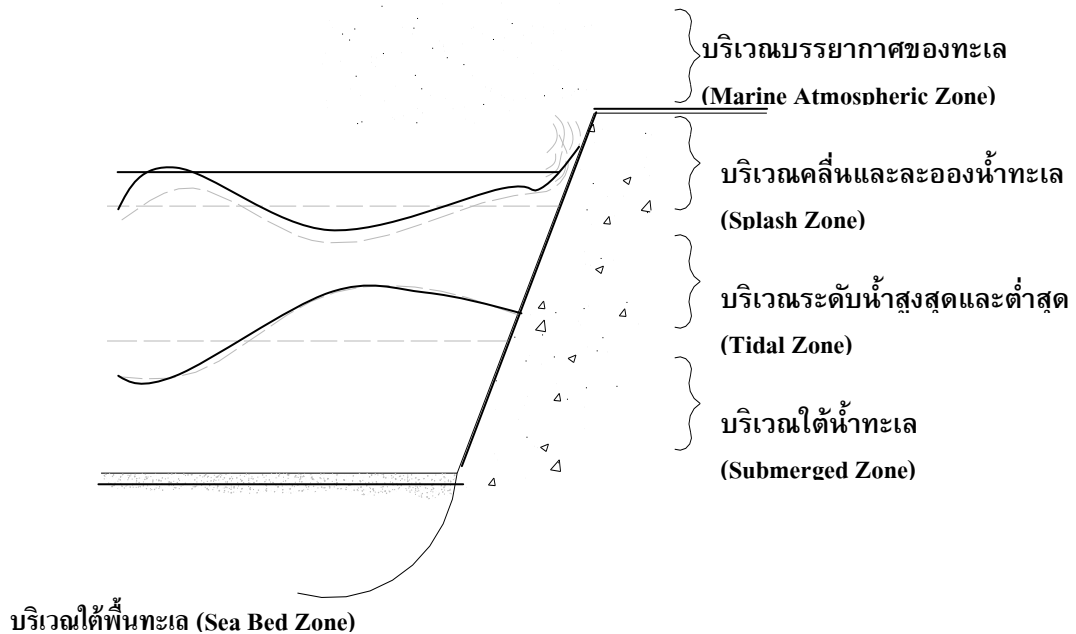
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กลไกการทำลายของโครงสร้างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล

โครงสร้างของคอนกรีตในน้ำทะเลและบริเวณชายฝั่งเป็นส่วนที่ต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่แปรปรวน ส่งผลให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นค่อนข้างสูงไม่ว่าจะเป็นการกัดกร่อนเนื่องจากสภาพแวดล้อมทางกายภาพโดยการได้รับแรงกระแทกจากคลื่น ทราบ กรวด โดยตรง ซึ่งส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนที่ผิวคอนกรีตหรือการกัดกร่อนที่เกิดจากกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องจากสารประกอบเคมีซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำทะเล โดยการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณจะมีความรุนแรงที่แตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในน้ำทะเลและสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เช่น ความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ตลอดจนสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการกัดกร่อนทางเคมีต่อโครงสร้างคอนกรีต (Broomfield, 1996 ; Neville, 1996; Kaushik et al., 1995 ; Thomas and Matthews, 2004) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยบริเวณบรรยากาศของทะเล (Marine Atmospheric Zone) เป็นบริเวณที่ไม่ได้รับแรงกระแทกและสัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรงอาจอยู่ห่างไกลจากทะเลหลายกิโลเมตร ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นผลเนื่องจากเกลือคลอไรด์ที่มีในอากาศ เกิดการพัดพาโดยลมสัมผัสกับเนื้อคอนกรีต เกิดการแพร่ของไอออนคลอไรด์ (Chloride Ions) เข้าไปในเนื้อคอนกรีตในบริเวณที่มีรอยแตกร้าวหรือมีความพรุน ส่งผลให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมเร็วขึ้นและเกิดการขยายตัวดันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหาย บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) บริเวณนี้จะได้รับแรงกระแทกค่อนข้างแรงส่งผลให้เกิดรอยปริแตกเล็กๆทำให้คลอไรด์และความชื้นซึมผ่านเข้าไปถึงเหล็กเสริมส่งผลให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ค่อนข้างสูง เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีออกซิเจนอยู่เป็นจำนวนมาก ประกอบกับการซึมผ่านของคลอไรด์ที่เร่งให้เกิดสนิมเหล็กมากขึ้น โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะเป็ผลเนื่องจากคลอไรด์เป็นหลัก และการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตจะมีน้อยมาก บริเวณที่สัมผัสกับน้ำทะเลในลักษณะเปียกและแห้งสลับกัน (Tidal Zone) จะได้รับผลกระทบทั้งจากคลื่น กรวด ทราบ ที่กระแทก ตลอดจนผลกระทบจากการกัดกร่อนเนื่องจากกระบวนการทางเคมีทั้งคลอไรด์และซัลเฟต ซึ่งน้ำทะเลจะเข้าสู่เนื้อคอนกรีตที่แห้งโดยการซึมผ่าน (Absorption) จนคอนกรีตอยู่ในสภาพอิ่มตัวและเมื่อสภาพแวดล้อมเปลี่ยนเป็นแห้งจะมีคราบเกลือที่ติดผิวคอนกรีต โดยเกลือของสารประกอบต่างๆ เมื่ออยู่ในสถานะของแข็งจะไม่เป็นอันตรายต่อ โครงสร้างคอนกรีต แต่เมื่อกลับมาสภาพเปียกอีกครั้ง จะได้เป็นสารละลายคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นมากขึ้นและ

แพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นซึ่งเมื่อน้ำลดคอนกรีตจะสัมผัสกับออกซิเจนและคลอไรด์ที่มีเข้มข้นอยู่แล้วในเนื้อคอนกรีตจะเร่งให้เกิดสนิมเหล็กมากขึ้น ความเสียหายที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมแบบนี้มีความรุนแรงมากขึ้นในกรณีในช่วงเวลาที่คอนกรีตแห้งนาน และนอกจากนั้นบริเวณนี้ยังได้รับผลกระทบจากการกัดกร่อนของซัลเฟตอีกด้วย ดังนั้นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างในสภาวะนี้ค่อนข้างสูง ซึ่งการศึกษาถึงกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นตลอดจนการศึกษาถึงแนวทางในการป้องกันและต้านทานการกัดกร่อนเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญและพัฒนาข้อมูลให้ชัดเจนมากขึ้น ส่วนบริเวณที่อยู่ใต้ผิวน้ำ (Submerged Zone) การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะมีความรุนแรงน้อยกว่า เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบที่รุนแรงจากคลื่นประกอบกับการซึมผ่านของออกซิเจนเข้าไปเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมมีน้อยมาก ถึงแม้ความเข้มข้นของคลอไรด์จะมีสูงแต่ถ้าไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจนก็จะไม่เกิดสนิมในเหล็กเสริม แต่การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องจากซัลเฟตที่เกิดปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์โดยตรง (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)



รูปที่ 2.1 ชนิดของสิ่งแวดล้อมทะเล (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)



## 2.2 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ (Broomfield, 1996 ; Neville, 1996 ; คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

### 2.2.1 กลไกการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

โดยทั่วไปแล้ว สารประกอบคลอไรด์จะไม่ส่งผลที่เป็นอันตรายกับเนื้อของคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริม ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้น้ำที่มีปริมาณของคลอไรด์ผสมในคอนกรีตกลับส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้น แต่การใช้งานของคอนกรีตในโครงสร้างทั่วไปจำเป็นต้องใส่เหล็กเสริมเข้าไปในคอนกรีตเพื่อรับแรงดึง ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตรับแรงดึงได้น้อยมาก และการที่ในคอนกรีตมีเหล็กเสริมนี้เองจึงส่งผลให้การทำลายเนื่องจากคลอไรด์ต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความชัดเจนและรุนแรงมาก ทั้งนี้เนื่องจากการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่ คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมและคอนกรีตบริเวณรอบๆ เหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหายเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริม ทำให้ดันคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าว ตลอดจนความสามารถในการรับแรงของเหล็กเสริมคอนกรีตต่ำลงและเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ลายองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดฟิล์มบางๆ ของ  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  เคลือบผิวเหล็กไว้ และฟิล์มนี้ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสนิมเหล็ก อย่างไรก็ตามอ็อกซิเจนของคลอไรด์สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ และเมื่อมีน้ำและก๊าซออกซิเจนตรงบริเวณเหล็กเสริมที่ไม่มีฟิล์มป้องกันอยู่ เหล็กจะเป็นสนิม โดยลักษณะการทำลายของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมจริงแสดงดังรูปที่ 2.2

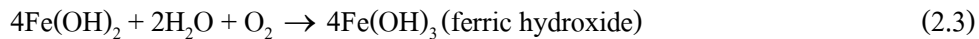
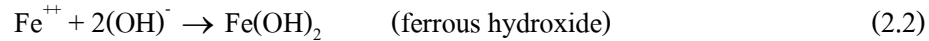


รูปที่ 2.2 ความเสียหายของคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์

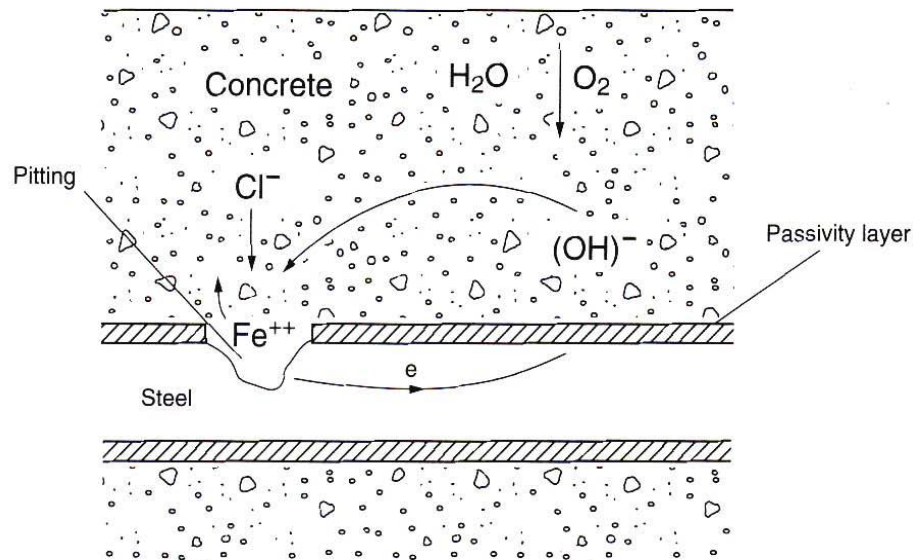
การเกิดสนิมในเหล็กเกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของเหล็กเสริมในคอนกรีต ทำให้เกิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีขึ้น มีขั้วบวก (Anode) และขั้วลบ (Cathode) เชื่อมกันโดยน้ำซึ่งมีคลอไรด์ในโพรงของซีเมนต์ ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ประจุไฟฟ้าบวกเฟอร์รัสไอออน  $\text{Fe}^{++}$  ที่ขั้วบวกจะวิ่ง

ไปสู่สื่ออิเล็กโทรไลต์ ขณะที่อิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าลบ  $e^-$  วิ่งตามเหล็กเสริมไปที่ขั้วลบ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะรวมกับน้ำและออกซิเจนทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ซึ่งวิ่งผ่านสื่ออิเล็กโทรไลต์ไปรวมกับ  $\text{Fe}^{++}$  ทำให้เกิด  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  และทำปฏิกิริยาออกซิเดชันจนทำให้เกิดสนิม ดังรูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาดังกล่าว แสดงดังสมการที่ 2.1 ถึง 2.4 (Broomfield, 1996)

Anodic reactions:



Cathodic reaction:



รูปที่ 2.3 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต (Broomfield, 1996)

จากสมการข้างต้น เมื่อออกซิเจนถูกใช้จนหมดไป น้ำก็สามารถทำปฏิกิริยาขึ้นมาใหม่ได้ แต่จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการเกิดที่ต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้จึงไม่เกิดการกัดกร่อนในคอนกรีตที่แห้งตลอดเวลา ซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ต่ำกว่าร้อยละ 60 หรือคอนกรีตที่จมอยู่ในน้ำทะเล ซึ่งไม่มีโอกาสได้สัมผัสกับอากาศ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมที่จะเกิดการกัดกร่อน อยู่

ในช่วงร้อยละ 70 ถึง 80 ถ้าความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่านี้ จะทำให้ออกซิเจนแพร่เข้าไปในคอนกรีตได้น้อยลง

ความต่างศักย์ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี สามารถเกิดขึ้น เมื่อคอนกรีตมีสภาพที่แตกต่างกัน เช่น ส่วนหนึ่งของคอนกรีตจมในน้ำทะเลตลอดเวลา แต่อีกส่วนหนึ่งต้องสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นระยะๆ ในบางกรณีความต่างของระยะหุ้มคอนกรีตส่งผลถึงการเชื่อมต่อของลวดไฟฟ้าเคมี มีผลทำให้เกิดความต่างศักย์ รวมไปถึงความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือของน้ำในโพรงคอนกรีตด้วย

สำหรับการกัดกร่อนในช่วงต้น ฟิล์มบางจะถูกเจาะ โดยคลอไรด์ไอออนจะกระตุ้นให้ผิวเหล็กเสริมกลายเป็นขี้บวก พื้นผิวด้านที่ไม่ถูกกระตุ้นก็จะมีสภาพเป็นขี้ลบ ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6



เนื่องจาก คลอไรด์ไอออนเป็นเป็นตัวก่อให้เกิดปฏิกิริยาอีกครั้ง ดังนั้นสนิมเหล็กที่เกิดขึ้นจึงไม่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ แม้ว่าเฟอร์รัสคลอไรด์จะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเซลล์ไฟฟ้าเคมี มีความจำเป็นต้องใช้น้ำในโพรงของคอนกรีตเป็นตัวกลางเชื่อมระหว่างขี้บวกและขี้ลบ ระบบโพรงของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวในคอนกรีตเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกัดกร่อน เนื่องจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยน้ำที่อยู่ในโพรงเป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ทำให้เหล็กเสริมเกิดการขยายตัว ปริมาตรเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดรอยแตก (Cracking) การหลุดล่อน (Spalling) ไปจนถึงคอนกรีตกับเหล็กเสริมไม่มีแรงยึดเหนี่ยวต่อกัน (Delamination) ในขณะที่เกิดการกัดกร่อนพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมที่ทำหน้าที่เป็นขี้บวกจะมีขนาดเล็กกลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดรูขนาดเล็กบนเหล็กเสริม

ความต่างศักย์เกิดจากการที่คอนกรีตมีความแตกต่างกัน ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น จากความแตกต่างของความชื้น ความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือของน้ำในโพรง ความแตกต่างของสภาพแวดล้อม และความแตกต่างของความหนาของคอนกรีตหุ้ม เป็นต้น เซลล์ไฟฟ้าในลักษณะนี้ของคอนกรีตเซลล์หนึ่งอาจยาว 10 มม. จนถึง 6 ม.

คอนกรีตอาจมีคลอไรด์เนื่องจากการใช้ส่วนผสมของวัสดุที่มีคลอไรด์ เช่น ใช้น้ำ ทราช หิน, ปูนซีเมนต์ หรือสารเคมีผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ปนอยู่ ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบว่ามีปริมาณคลอไรด์อยู่ในปริมาณที่ไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อคอนกรีต ว.ศ.ท. ได้กำหนดปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ละลายน้ำ

ได้ในคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อป้องกันการเกิดสนิมต้องมีค่าไม่เกินพิกัดตามตารางที่ 2.1 โดยคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตอัดแรงจะกำหนดไว้ค่อนข้างต่ำคือไม่เกินร้อยละ 0.06 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตอัดแรงต้องใช้เหล็กเสริมที่มีกำลังสูง และการทำลายพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมเพียงเล็กน้อยก็ส่งผลต่อการรับแรงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กค่อนข้างชัดเจน ดังนั้นจึงยอมให้ปริมาณคลอไรด์ที่เข้าไปสัมผัสค่อนข้างน้อย เพื่อลดความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

ตารางที่ 2.1 ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ไอออนเพื่อป้องกันการเกิดสนิม (คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

ชนิดขององค์อาคาร	ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ไอออน (CI) ที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)
คอนกรีตอัดแรง	0.06
คอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับคลอไรด์ในขณะใช้งาน	0.15
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแห้งหรือที่มีการป้องกันความชื้นในขณะใช้งาน	1.00
งานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆ	0.30

### 2.2.2 ปริมาณคลอไรด์ในปฏิภาคส่วนผสม

ปริมาณคลอไรด์ที่พบในคอนกรีต อาจมีสาเหตุมาจากการใช้มวลรวมที่ไม่สะอาด หรือคอนกรีตนั้นสัมผัสกับน้ำทะเล น้ำกร่อย หรือการใช้สารเคมีผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ จากสาเหตุข้างต้นทำให้ มาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กของประเทศต่างๆ อนุญาตให้มีปริมาณคลอไรด์ขึ้นต่ำไม่เกินค่าที่กำหนด เช่น BS 8110 Part 1 กำหนดปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride-ion) ในคอนกรีตเสริมเหล็กไม่เกินร้อยละ 0.40 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ สำหรับ ACI 318-89 ใช้ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water-soluble Chloride ions) เป็นตัวหลักในการพิจารณา โดยกำหนดให้ปริมาณคลอไรด์ไม่ควรเกินร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนักของของปูนซีเมนต์ โดยหลักใหญ่ใจความ ค่าทั้งสองนี้ ไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจาก ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำเป็นส่วนหนึ่งของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด บางครั้งคลอไรด์ที่ละลายในน้ำเรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free chloride) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสามารถหาได้โดยวิธีทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1152

ส่วนผสมคอนกรีตที่สามารถพบคลอไรด์ เริ่มต้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่ามีปริมาณคลอไรด์น้อยมาก คือ น้อยกว่าร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก น้ำคั้นสามารถพบปริมาณคลอไรด์ 250 พีพีเอ็ม ในส่วนของมวลรวม BS 882 กำหนดค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงสุด เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐาน BS 5328 Part 1 และ BS 8110 Part 1 นั่นคือ ปริมาณคลอไรด์ของมวลรวมในคอนกรีตเสริมเหล็กไม่ควรเกินร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมด และไม่ควรมีเกินร้อยละ 0.03 เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ประเภททนซัลเฟต สำหรับคอนกรีตอัดแรงอนุญาตให้มีปริมาณคลอไรด์ในมวลรวมไม่เกินร้อยละ 0.01 ปริมาณคลอไรด์ที่กำหนดขึ้นข้างต้น เป็นค่าที่ทำให้มั่นใจได้ว่า จะไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ เว้นแต่มีคลอไรด์ซึมเข้ามาเพิ่มเติมในคอนกรีต ขณะที่คอนกรีตนั้นใช้งานอยู่

### 2.2.3 การซึมผ่านของคลอไรด์

ปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์สามารถเกิดขึ้นได้เสมอ เมื่อคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีต โดยเฉพาะในกรณีที่คอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเล คลอไรด์ที่พบมีแหล่งที่มาจากน้ำทะเลนั่นเอง โดยคลอไรด์จะตกค้างบนผิวหน้าคอนกรีตในรูปของไอเกลือของน้ำทะเลที่มีขนาดเล็ก ซึ่งถูกพัดพามากับคลื่นและกระแสน้ำ หรืออาจอยู่ในรูปของละอองน้ำทะเล ซึ่งทำให้คอนกรีตมีสภาพเปื่อยขึ้นเนื่องจากละอองน้ำทะเล ไอของคลอไรด์สามารถพัดพาไปได้ไกลถึง 2 กิโลเมตร

อย่างไรก็ตาม คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีตได้ โดยอาศัยน้ำเป็นตัวนำพา และเมื่อคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง มีผลทำให้บริเวณผิวเหล็กเสริมเกิดการสะสมของคลอไรด์ไอออนในปริมาณที่สูง เมื่อคอนกรีตจมอยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลา ก็ย่อมเกิดการซึมผ่านของคลอไรด์ แต่บริเวณใต้น้ำทะเลมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยและอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตเป็นช่องว่างที่อึดตัวด้วยน้ำ ทำให้ไม่มีออกซิเจนที่จะไปรวมตัวกับน้ำและอิเล็กตรอนที่ขั้วลบ สำหรับคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปื่อยสลับแห้ง ปริมาณคลอไรด์ที่พบในคอนกรีตจะสูงขึ้น ซึ่งพบมากกับโครงสร้างที่ตั้งอยู่ตามชายฝั่ง ในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น

เมื่อคอนกรีตเริ่มสัมผัสกับน้ำทะเล คอนกรีตจะดูดซับน้ำทะเลจนกระทั่งคอนกรีตนั้นอึดตัวไปด้วยน้ำ และถ้าหากสภาพภายนอกคอนกรีตเปลี่ยนเป็นสภาพแห้ง ทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำจะเกิดการเคลื่อนที่ย้อนกลับ และระเหยออกจากคอนกรีต ทำให้เกลือเกลือตกค้างในช่องว่าง เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปื่อยอีกครั้ง ความเข้มข้นของเกลือบริเวณใกล้ผิวหน้าจะสูงขึ้น โดยเกลือที่มีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะเกิดการถ่ายเทไปยังบริเวณภายในที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า เรียกการถ่ายเทเทคนิคนี้ว่า การแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปื่อยและแห้ง ส่งผลให้เกลือยังสามารถแพร่เข้าไปในคอนกรีตและเข้าไปสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น ความสามารถในการแพร่ของเกลือนั้น ขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกคอนกรีต และช่วงระยะเวลาที่คอนกรีตแห้งตัว

โดยทั่วไป คอนกรีตจะเปื่อยได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก ทำให้ภายในของคอนกรีตไม่สามารถแห้งโดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลตลอดเวลา จึงเกิดขึ้นได้ช้ากว่าคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง

ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว สภาพเปียกสลับแห้งมีอิทธิพลโดยตรงต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ รวมไปถึงการได้รับผลกระทบเนื่องจาก ทิศทางการพัดพาของน้ำทะเล กระแสลม อุณหภูมิ ความชื้น แสงอาทิตย์ และลักษณะการใช้งานของโครงสร้าง ซึ่งแต่ละส่วนของโครงสร้างก็ย่อมมีโอกาสสัมผัสกับสภาพเปียกสลับแห้งที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงสภาพแวดล้อมที่ก่อให้เกิดความเสียหายเนื่องการกัดกร่อนของแต่ละส่วนของโครงสร้าง การที่คอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียก เป็นการเร่งให้คลอไรด์สามารถซึมเข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ด้วยเหตุนี้ คอนกรีตบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) จึงเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์น้อยกว่าบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash zone) คอนกรีตที่สัมผัสน้ำทะเลเป็นบางครั้งบางคราวมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเล เช่น คอนกรีตบริเวณหลักสำหรับผูกเชือก คอนกรีตบริเวณหัวดับเพลิงที่ใช้น้ำทะเล พื้นที่โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำทะเลในการซักล้าง เป็นต้น

#### 2.2.4 ปริมาณคลอไรด์ที่กระตุ้นให้เหล็กเริ่มเกิดสนิม

กระบวนการการกัดกร่อนของเหล็กเสริม เริ่มต้นเมื่อมีปริมาณคลอไรด์เพียงเล็กน้อยที่ผิวเหล็ก แต่เป็นการยากที่จะกล่าวว่า ปริมาณหรือความเข้มข้นของคลอไรด์เท่าใด ที่จะกระตุ้นให้เหล็กเสริมเป็นสนิม เนื่องจากขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งยังไม่สามารถอธิบายให้ชัดเจนได้ ยิ่งไปกว่านั้น การแพร่ของคลอไรด์เข้าไปยังซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว มีรูปแบบที่ไม่แน่นอนอน ภายในห้องปฏิบัติการ มีการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการซึมผ่านของคลอไรด์ในรูปของรูปตัดตามยาว (Chloride profiles) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีป้องกันการเกิดสนิมอันเนื่องจากการซึมผ่านของคลอไรด์ ซึ่งจะใช้วิธีพิจารณาหาระยะหุ้มที่เหมาะสมสำหรับเหล็กเสริม

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้พยายามที่จะศึกษาปริมาณคลอไรด์ที่ส่งผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเป็นสนิม หรือที่เรียกว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (Threshold chloride) ซึ่งพบว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตธรรมดา มีค่าในช่วงร้อยละ 0.3-0.5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา และพบว่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.1-0.3 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (Glass and Buenfeld, 1997 ; Hui Yu et al., 2012) นอกจากนี้ในปริมาณคลอไรด์ที่เท่ากัน พบว่าคอนกรีตที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ในปริมาณส่วนผสมตั้งแต่เริ่มต้น จะมีอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีคลอไรด์ผสมอยู่ในปริมาณส่วนผสมหลังจากคอนกรีตนั้นมีการใช้งานไปแล้ว

ในปริมาณคลอไรด์ที่เท่ากัน คอนกรีตที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ในปฏิกิริยาส่วนผสมตั้งแต่เริ่มต้น จะเกิดอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมสูงกว่าคอนกรีตที่มีการซึมผ่านของคลอไรด์หลังจากคอนกรีตนั้นมีการใช้งานไปแล้ว ขณะที่เกิดกระบวนการซึมผ่านของคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์ที่สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีต ขึ้นอยู่กับ ความสามารถในการต้านทานของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว, การเปลี่ยนแปลงความชื้น และปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นผลเนื่องจากลักษณะของการแช่คอนกรีต

ในกรณีทั่วไป ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดไม่ได้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความรุนแรงของการกัดกร่อน แต่คลอไรด์ทั้งหมดสามารถจำแนกออกได้ 3 ส่วน คือ Chemically bound ซึ่งรวมอยู่ในผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา ไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ อีกส่วนหนึ่ง คือ Physically bound ซึ่งติดอยู่ที่ผิวโพรงของเจล (Gel pores) และส่วนสุดท้าย เรียกว่า คลอไรด์อิสระ ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเกิดสนิมของเหล็กอย่างสูง อย่างไรก็ตาม การกระจายตัวของคลอไรด์ไอออนทั้ง 3 ชนิด ไม่สามารถคงอยู่ได้ในสถานะเดิมตลอดเวลา แต่สามารถปรับเปลี่ยนเพื่อให้ไอออนทั้งหมดอยู่ในสภาวะสมดุล เช่น ตามปกติคลอไรด์อิสระจะพบตามน้ำที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต ถ้าคลอไรด์อิสระมีปริมาณที่มากเกินไปจนความจำเป็น คลอไรด์อิสระนั้นจะกลายสภาพไปเป็นคลอไรด์ยึดจับ เพื่อให้ไอออนอื่นๆ อยู่ในสภาพสมดุล

#### 2.2.5 การดักจับคลอไรด์ไอออน

การดักจับคลอไรด์ไอออนอยู่ในรูปปฏิกิริยาเคมีกับ  $C_3A$  ก่อให้เกิดแคลเซียมคลอโรลูมินเนต ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ) บางครั้งเรียกว่า เกลือของฟรีเดล (Friedel's salt) ในลักษณะเดียวกัน คลอไรด์ก็ถูกดักจับโดย  $C_4AF$  ผลที่ได้คือแคลเซียมคลอโรเฟอร์ไรต์ ( $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ) ดังนั้นจากปฏิกิริยาข้างต้นคลอไรด์ไอออนจะถูกดักจับเมื่อปูนซีเมนต์มีปริมาณ  $C_3A$  สูง หรือ ปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก ด้วยเหตุนี้ การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ  $C_3A$  สูง จะช่วยต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ได้ดี

ในขณะเดียวกัน การป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต มีความต้องการปริมาณ  $C_3A$  ต่ำ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงปริมาณ  $C_3A$  ในปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อป้องกันความเสียหายจากซัลเฟต และเพื่อป้องกันอันตรายจากคลอไรด์ในน้ำทะเลควบคู่กันไป ขณะที่ปัจจุบัน ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ตัดแปด (ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทสอง) ซึ่งสามารถทนซัลเฟตได้ปานกลาง และให้ความร้อนไม่สูงมากนัก เป็นอีกตัวเลือกในการนำไปใช้งาน บางครั้งการใช้ปูนซีเมนต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground granulated blast furnace slag) ก็สามารถช่วยในการดักจับคลอไรด์ไอออน โดยอลูมินเนตที่มีอยู่ในตะกรัน (Slag) ทำหน้าที่ในการดักจับ แต่งานวิจัยที่ศึกษาในเรื่องนี้ยังมีจำนวนน้อย การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ  $C_3A$  สูง มีข้อจำกัดตรงที่ เมื่อ  $C_3A$  มีปริมาณสูงย่อมทำให้เกิด

ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูง และทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้ง่าย พฤติกรรมดังกล่าวจึงกลายเป็นข้อด้อย และเป็นอันตรายต่อการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ที่ต้องสัมผัสกับน้ำทะเล

เมื่อพิจารณา ความเข้มข้นคลอไรด์ในน้ำที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต พบว่าที่สภาวะสมดุล ความเข้มข้นของคลอไรด์จะขึ้นอยู่กับไอออนอื่นๆที่กระจายตัวอยู่ในน้ำตามช่องว่าง เช่น ที่ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดค่าหนึ่ง ถ้าไฮดรอกไซด์ไอออนมีความเข้มข้นสูง คลอไรด์อิสระก็就会有ความเข้มข้นสูงด้วย ด้วยเหตุนี้ในบางครั้ง อัตราส่วนระหว่าง  $Cl^-/OH^-$  อาจใช้ในการพิจารณาถึงความก้าวหน้าของการกักคร่อน แต่ไม่ได้เป็นค่ามาตรฐานในการพิจารณาเรื่องดังกล่าว อีกทั้งมีการพบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในปฏิกิริยาคอนกรีตเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จะมีปริมาณคลอไรด์อิสระสูงกว่า เกลือแคลเซียมคลอไรด์ ( $CaCl_2$ ) อย่างมีนัยสำคัญ นั่นหมายความว่า น้ำทะเลซึ่งมีเกลือโซเดียมคลอไรด์ละลายอยู่ จะเกิดกักคร่อนของเหล็กเสริมอย่างแน่นอน เนื่องจากปัจจัยที่มีความหลากหลาย สัดส่วนของคลอไรด์ยึดจับจึงมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงร้อยละ 50 ถึง 80 หรืออาจต่ำกว่าร้อยละ 50 ของคลอไรด์ทั้งหมด ดังนั้น อาจจะไม่เป็นความจริงที่คลอไรด์ยึดจับที่อยู่ในคลอไรด์ทั้งหมดจะไม่ก่อให้เกิดการกักคร่อน

### 2.3 การกักคร่อนเนื่องจากซัลเฟต (Neville, 1996 ; ปรินญา จินดาประเสริฐ, 2547 ; คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

เกลือซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำใต้ดิน เช่น โซเดียมซัลเฟต ( $Na_2SO_4$ ), โพแทสเซียมซัลเฟต ( $K_2SO_4$ ), แมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) และแคลเซียมซัลเฟต ( $CaSO_4$ ) ความรุนแรงของการทำลายของซัลเฟตต่อคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟต และความชื้น ซึ่งสารซัลเฟตที่อยู่ในสถานะของแข็งจะไม่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต และการทำลายของซัลเฟตจะไม่เกิดขึ้น เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่มีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อคอนกรีตเปียกชื้น และรุนแรงอย่างมากในกรณีที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง โดยสารละลายจะค่อยๆ ซึมเข้าไปภายในช่องว่างของเนื้อคอนกรีตและทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดการขยายตัวและแตกร้าวจนไม่สามารถรับกำลังได้

#### 2.3.1 กระบวนการกักคร่อนของสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีต

เกลือซัลเฟตที่พบในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตได้แก่ โซเดียมซัลเฟต ( $Na_2SO_4$ ) แมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) และแคลเซียมซัลเฟต ( $CaSO_4$ ) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วคอนกรีตจะมีส่วนผสมของมวลรวมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่มวลรวมจะมีผลในการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตน้อยมาก ดังนั้นจึงนำมาเสนอเฉพาะกระบวนการกักคร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับซัลเฟตเท่านั้น โดยจะนำเสนอเฉพาะสารประกอบซัลเฟตที่ส่งผลกระทบต่อการทำลายคอนกรีต และพบมากในสภาพแวดล้อมทั่วไป เช่น ในสภาวะแวดล้อมทะเล ในบริเวณดินเค็มเป็นต้น โดยในที่นี้จะกล่าวถึง



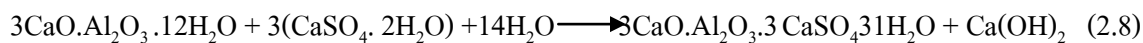
กระบวนการกัดกร่อนเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งพบมากในสภาพแวดล้อมทั่วไปและมีผลต่อการทำลายโครงสร้างคอนกรีตค่อนข้างรุนแรง ซึ่งโดยภาพรวมแล้วการทำลายเนื่องจากซัลเฟตต่อคอนกรีตจะเป็นไปในลักษณะที่ทำให้คอนกรีตขยายตัว แตกกร้าวและสูญเสียกำลังรับแรงเชิงกล รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการทำลายของสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีต



รูปที่ 2.4 ลักษณะการทำลายของสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีต

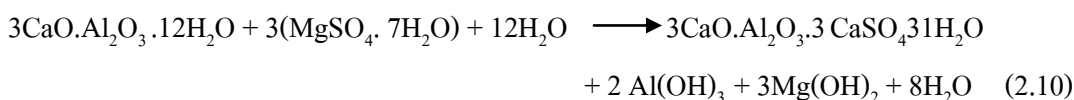
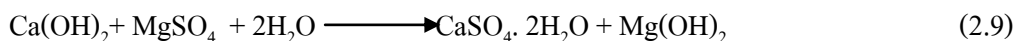
#### 1) กระบวนการกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ต่อคอนกรีต

กระบวนการกัดกร่อนของสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีตเริ่มต้นจากปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Na}_2(\text{OH})_2$ ) และแคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) หรือ ยิปซัม ตามสมการที่ (2.7) โดยยิปซัมจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ C-A-H ซึ่งได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังสมการที่ (2.8) และบางส่วนอาจเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตที่ซัลเฟตอ่อนหายไป หรืออาจเกิดปฏิกิริยากับ  $\text{C}_3\text{A}$  ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งทั้งหมดนี้ทำให้ได้แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ) หรือ Ettringite



#### 2) กระบวนการกัดกร่อนของแมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) ต่อคอนกรีต

ปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมซัลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ได้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Mg(OH)_2$ ) และแคลเซียมซัลเฟตหรือ ยิปซัม ตามสมการที่ (2.9) จากนั้น ยิปซัมจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ C-A-H ดังที่ได้กล่าวมาแล้วตามสมการที่ (2.8) ได้ผลเป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต หรือ Ettringite นอกจากนั้นแมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) ยังทำปฏิกิริยากับ C-A-H ได้เป็น แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $Al(OH)_3$ ) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Mg(OH)_2$ ) ตามสมการที่ (2.10) อีกด้วย



นอกจากนี้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันยังทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตได้เป็นยิปซัม แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาเจล ( $SiO_2 \cdot nH_2O$ ) ตามสมการที่ (2.11)



ยิปซัมที่เกิดขึ้นนี้ยังไปทำปฏิกิริยากับ C-A-H ตามสมการที่ (2.10) อีกด้วยซึ่งผลที่ได้เป็น Ettringite เหมือนเดิม ส่วนซิลิกาเจล ( $SiO_2 \cdot nH_2O$ ) ตามสมการที่ (2.11) ยังทำปฏิกิริยากับ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ได้เป็น แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $4MgO \cdot SiO_2 \cdot 8.5H_2O$ ) ดังสมการที่ (2.12)



ยิปซัมและแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตที่เกิดขึ้น มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าสารประกอบเดิม มีการขยายตัวทำให้มีปริมาตรมากขึ้น และเกิดแรงดันภายในคอนกรีตเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าวในที่สุด ส่วนซิลิกาเจลและแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต เป็นสารที่ไม่แข็งแรงเท่ากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่สูญเสียไปทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง การลดปริมาณของ  $C_3A$  ให้น้อยลงจะทำให้ปริมาณของแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตลดลง ส่งผลให้ปริมาณการเกิดยิปซัม แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต และแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตลดลงตามไปด้วย ทำให้การกักกร่อนของซัลเฟตลดลง ดังนั้นการใช้ปูนซีเมนต์ที่มี  $C_3A$  ต่ำ จึงสามารถลดการกักกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของไทย มอก. 15 ได้กำหนดปริมาณ  $C_3A$  ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนทนซัลเฟตไว้ไม่เกินร้อยละ 5 ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่ได้กำหนดไว้ อย่างไรก็ตาม ACI 318 แนะนำว่าหากใช้ปูนซีเมนต์ที่มี  $C_3A$  มากถึงร้อยละ 10 ควรใช้ W/C ต่ำคือประมาณ 0.4 ซึ่งจะทำให้การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตลดลงและการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตก็จะลดลงด้วย ในกรณีที่ความเข้มข้นของซัลเฟตสูง คือเมื่อมีซัลเฟตในดินร้อยละ 0.2 หรือมีซัลเฟตในน้ำ 1,500 ถึง 10,000 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ค่า W/C ที่ใช้ไม่ควรเกิน 0.45 และควรใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และในกรณีที่ความเข้มข้นของซัลเฟตสูงมาก คือมีซัลเฟตในดินเกินร้อยละ 2.0 หรือมีซัลเฟตในน้ำเกินกว่า 10,000 ppm นอกจากคอนกรีตต้องมี W/C ไม่เกิน 0.45 แล้ว ยังต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมกับวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน เป็นต้น ทั้งนี้ต้องตรวจสอบว่าวัสดุปอซโซลานสามารถเพิ่มความต้านทานซัลเฟตในสภาวะดังกล่าวได้

แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต หรือ Ettringite เป็นสารที่ไม่ละลายน้ำมีการขยายตัวทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวซึ่งโดยส่วนมากแล้วสารนี้เกิดจากสารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของอลูมิเนต ดังนั้นในการผลิตปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟตจึงมีเหตุผลที่ต้องจำกัดปริมาณของ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ให้น้อย ซึ่งสารเหล่านี้ไม่ช่วยให้กำลังคอนกรีตเพิ่มมากนักดังที่กล่าวมาแล้ว

แคลเซียมซัลเฟตหรือ ยิปซัม เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่าง แคลเซียมไฮดรอกไซด์กับแมกนีเซียมซัลเฟต โดยยิปซัมจะมีการขยายตัวมากกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารดั้งเดิม ถึง 2.2 เท่า เป็นผลทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและแตกร้าว นอกจากนั้นยังทำให้คอนกรีตสูญเสียความสามารถในการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม อันเนื่องมาจากเกลือที่เกิดขึ้นสามารถชะล้างออกไปได้ง่ายส่งผลให้เนื้อคอนกรีตหายไปและมวลรวมหลุดออกจากคอนกรีตได้ง่าย โดยในกระบวนการผลิตคอนกรีตสามารถลดปริมาณของยิปซัมลงได้โดยการเติมสารที่มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานเพื่อลด  $C_3S$  และ  $C_2S$  ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และจะเป็นแนวทางการศึกษาในงานวิจัยในครั้งนี้

แมกนีเซียมซัลเฟตไฮเดรต เป็นสารประกอบที่เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาเจลกับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยสารนี้มีลักษณะเป็นสีขาวและส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง

### 2.3.2 วิธีการวัดความต้านทานต่อซัลเฟต

#### 1) ทดสอบกำลังอัด

การทดสอบการกัดกร่อนของซัลเฟตต่อคอนกรีตหรือมอร์ตาร์สามารถทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างที่แช่อยู่ในสารละลายซัลเฟตโดยตรง โดยตัวอย่างคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ที่มีการสูญเสียกำลังอัดน้อย แสดงว่าต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้สูง

## 2) ทดสอบการขยายตัวของมอร์ตาร์

การทดสอบการขยายตัวเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 1012 ซึ่งนำแท่งมอร์ตาร์ขนาดหน้าตัด 25x25 มม. ยาว 285 มม. โดยมีมอร์ตาร์มีกำลังอัดระหว่าง 19 ถึง 21 เมกะปาสกาล แหะในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 จากนั้นวัดการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ตามอายุที่กำหนด หากแท่งมอร์ตาร์ที่แหะในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีการขยายตัวน้อยแสดงว่าวัสดุประสานสามารถต้านทานการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตได้

## 2.4 วัสดุปอซโซลาน (ปริญา และชัย, 2547)

ASTM C 618 ได้นิยามว่า วัสดุปอซโซลานหมายถึงวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีของ ออกไซด์ของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเหล็ก ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานเมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะมีลักษณะเป็นฝุ่นและไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานระหว่างอนุภาค แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นเพียงพอภายใต้อุณหภูมิปกติ จะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ทำให้เกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานได้คล้ายปูนซีเมนต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)

ซึ่งปัจจุบันได้มีการแบ่งวัสดุปอซโซลานเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาว (Matakaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่งคือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟุ้ง เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าชานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น

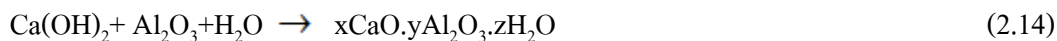
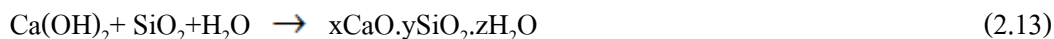
เมื่อวัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนได้แล้ว และยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้น ทั้งคอนกรีตที่อยู่สภาพเหลว เช่น ความสามารถเทได้ และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เช่น กำลังอัด และสิ่งที่สำคัญคือ ต้องการให้ได้คอนกรีตที่มีความทนทานเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมต่างๆ รวมทั้งต้องการต้นทุนในการผลิตคอนกรีตลดลง เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ แต่อย่างไรก็ตามในการใช้วัสดุปอซโซลานนั้น ต้องคำนึงถึงอัตราส่วนผสมที่พอเหมาะด้วย จึงได้มีการวิจัยและพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง

## 2.5 ปฏิกิริยาปอซโซลาน (ปริญา และชัย, 2547)

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) และมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  หรือ C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ( $3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  หรือ C-A-H)

### 2.5.1 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาไตรออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ดังสมการที่ (2.13) และ (2.14) ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อย ๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปี ครึ่งก็ตาม



### 2.5.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหิน

ความสามารถของเถ้าถ่านหินในการรวมตัวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ขึ้นอยู่กับความละเอียดและคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปมีส่วนประกอบที่มีสถานะซึ่งไม่เป็นผลึก (glassy phase) อยู่ประมาณร้อยละ 70 ถึง 80 โดยเถ้าถ่านหินที่ละเอียดมีความไม่เป็นผลึกสูงกว่าเถ้าถ่านหินที่หยาบ เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงจึงสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดต่ำ และให้กำลังที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจสูงกว่ามอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ไม่มีการใช้เถ้าถ่านหิน นอกจากนี้เถ้าถ่านหินที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำสามารถพัฒนากำลังได้เร็วเช่นกัน

## 2.6 เถ้าถ่านหิน (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547)

### 2.6.1 การเผาถ่านหิน

ถ่านหินที่ใช้ในการเผาผลิกระแสไฟฟ้ามีอยู่ 4 ชนิด ได้แก่

- 1) แอนทราไซต์ (anthracite)
- 2) บิทูมินัส (bituminous)

3) ซับบิทูมินัส (sub-bituminous)

4) ลิกไนต์ (lignite)

ถ่านหินคุณภาพดีที่สุดได้แก่ แอนทราไซต์ สามารถให้ความร้อนได้สูงสุด และมีปริมาณความชื้นต่ำ ตามด้วยบิทูมินัส ซับบิทูมินัสและลิกไนต์ตามลำดับ โดยลิกไนต์ให้ความร้อนต่ำและมีความชื้นสูง นอกจากนี้ถ่านหินทั้ง 4 ชนิดนี้แล้วยังมีพีท (Peat) ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุดให้ความร้อนต่ำสุดและมีความชื้นสูงสุด จึงไม่นิยมเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า

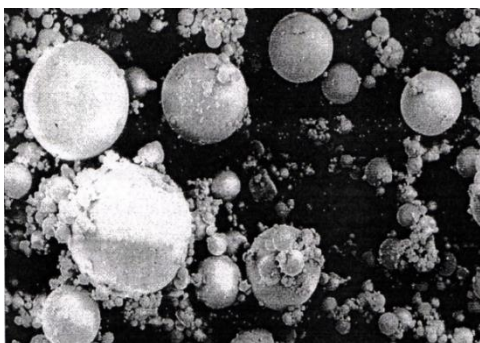
การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีใช้กันอยู่ 3 ระบบ ได้แก่

1) การเผาความร้อนสูง

เป็นการเผาที่อุณหภูมิสูงจะสูงถึง 1,500 ถึง 1,700 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้แรงลม (Cyclone Combustion) ที่อุณหภูมิสูง ถ่านหินส่วนใหญ่จะหลอมละลาย และรวมกันเป็นเม็ดหรือก้อน ถ่านหินส่วนที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าก้นเตาและตกลงในอ่างน้ำข้างล่าง ถ่านหินขนาดเล็กจะเป็นเถ้าลอยซึ่งในระบบการเผา นี้จะมีปริมาณค่อนข้างน้อย ถ่านหินที่ได้จะมีลักษณะเป็นแก้วเม็ดออกใสๆ (Vitreous Particle)

2) การเผาความร้อนปานกลาง

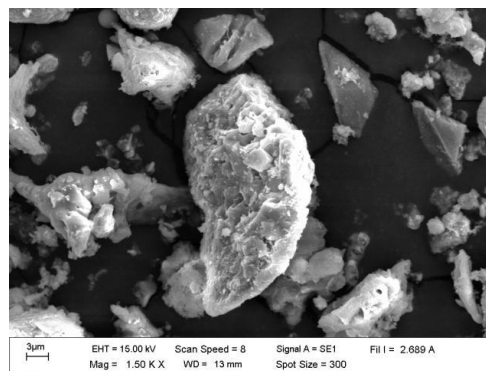
อุณหภูมิของการเผาถ่านหินบดในเตาเผาความร้อนปานกลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1,100 ถึง 1,400 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized Coal Combustion) ถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าลอย ที่เหลือจะเป็นเถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตา เถ้าลอยที่ได้จากการเผา นี้ประมาณร้อยละ 70 ถึง 90 มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ถ่านหินที่ได้จากการเผาในแบบนี้จะมีลักษณะทรงกลม ผิวเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เป็นเถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อทำคอนกรีต



รูปที่ 2.5 รูปขยายอนุภาคของถ่านหินจากแม่เมาะที่ได้จากการเผาแบบ Pulverized Coal

### 3) การเผาความร้อนต่ำ

การเผาความร้อนต่ำเป็นการเผาในเตาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized-bed Combustion) อุณหภูมิของการเผาด่านหินจะค่อนข้างต่ำคือไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส เถ้าถ่านหินที่ได้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) ผิวขรุขระ และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากเถ้าถ่านหินที่ได้ไม่ได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่สูงพอ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 แม้จะสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานได้แต่ไม่ดีเท่าเถ้าลอยที่ได้จากการเผาความร้อนปานกลาง แต่วิธีนี้ก็เริ่มใช้กันมากขึ้นสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กในโรงงานต่าง ๆ



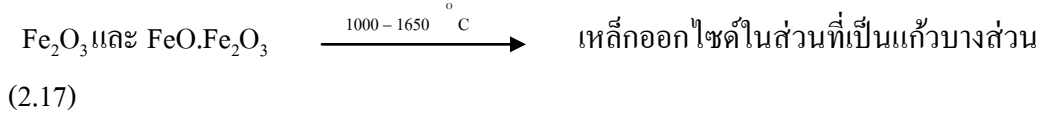
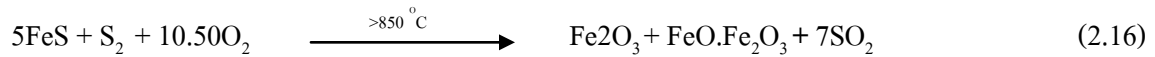
รูปที่ 2.6 รูปขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบ Fluidized-bed

เถ้าถ่านหินหากมีความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาในปริมาณสูงจะทำให้คุณภาพของเถ้าถ่านหินลดลง มาตรฐาน ASTM C 311 กำหนดให้ทดสอบปริมาณความชื้นโดยการเผาจนน้ำหนักคงที่ที่อุณหภูมิ 105 ถึง 110 องศาเซลเซียส และทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ตามมาตรฐาน ASTM C 114-15 โดยการเผาตัวอย่างเดิมที่ใช้ทดสอบปริมาณความชื้นที่อุณหภูมิ 750±50 องศาเซลเซียส โดยใช้ถ้วยดินขาวเผา (porcelain) มาตรฐาน ASTM C 618 ระบุปริมาณความชื้นให้ได้ไม่เกินร้อยละ 0.3 ขณะที่การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ระบุให้ไม่เกินร้อยละ 6

#### 2.6.2 การเปลี่ยนแปลงของถ่านหินภายใต้การเผา

ถ่านหินมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ควอตซ์ (Quartz) เคาลินไนต์ (Kaolinite) อิลไลต์ (Illite) ไพไรต์ (Pyrite) และแคลไซต์ (Calcite) นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นผสมอยู่เล็กน้อยซึ่งได้แก่ คลอไรต์ (Chlorite) มาเคไซต์ (Marcasite) และเฟลด์สปาร์ (Feldspar) เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ แร่ธาตุในถ่านหินจะเปลี่ยนสถานะ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

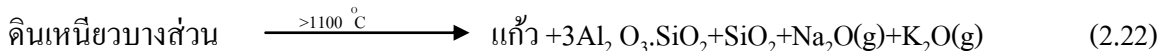
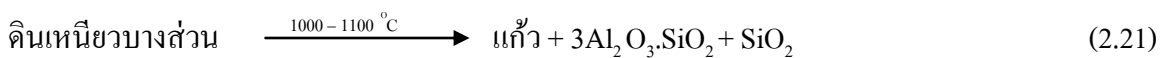
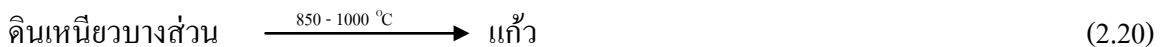
1) ไพไรต์และมาเคไซต์ เปลี่ยนเป็นเฮมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และแมกเนไทต์ ( $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ในรูปของผลึกและเป็นเหล็กออกไซด์ในส่วนที่เป็นแก้ว (Glassy Phase) ของเถ้าถ่านหิน ดังสมการที่ 2.15–2.17



2) แคลไซต์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแอนไฮไดรต์ (CaSO<sub>4</sub>) ดังสมการที่ 2.18–2.19



3) ดินเหนียวจะสูญเสียน้ำและเปลี่ยนเป็น แก้ว มุลไลต์ (Mullite, 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>) และควอตซ์ (SiO<sub>2</sub>) ในรูปของผลึกของคริสโตบาลิต (Cristobalite) ดังสมการที่ 2.20–2.22



4) ควอตซ์ (SiO<sub>2</sub>) จะเกิดการหลอมละลายบางส่วนและกลายเป็นแก้ว ดังสมการที่ 2.23



จะเห็นว่าถ้าถ่านหินประกอบด้วยแก้วและผลึกซึ่งปริมาณจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา ในการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส ของระบบฟลูอิดไคซ์เบดอุณหภูมิจะไม่สูงพอ ถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน สารประกอบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของผลึก ในการเผาแบบนี้ถ้าถ่านหินมีปริมาณซัลเฟอร์สูงจะนิยมใช้แคลไซต์ (Calcite) ผสมถ่านหินเพื่อลดปริมาณออกไซด์ของซัลเฟอร์ แต่จะทำให้ถ่านหินมีปริมาณ CaO และ CaSO<sub>4</sub> สูงได้



ในระบบความร้อนปานกลางอุณหภูมิในการเผาประมาณ 1,300 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสูงพอที่จะทำให้เถ้านหินหลอมละลาย ดังนั้นเถ้านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และมีผลึกของเฮมาไตต์ แมกเนไตต์ มุลไลต์ และควอตซ์ ประกอบอยู่เล็กน้อย นอกจากนั้นยังมีแร่ธาตุที่เผาไหม้ไม่หมดและแร่ธาตุอื่น เช่น แคลไซต์ ไพไรต์ แอนไฮไดรต์ และดินเหนียวหลงเหลืออยู่

การเผาในเตาเผาแบบความร้อนสูงที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,500 องศาเซลเซียส ถ่านหินเกิดการเผาไหม้และหลอมละลาย เถ้านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สูงและมีส่วนที่เป็นผลึกจะเหลืออยู่น้อย ขณะเดียวกันการเผาไหม้ถ่านหินที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดก๊าซซึ่งบางส่วนถูกกักอยู่ในเถ้านหิน ทำให้เถ้านหินจำนวนมากที่เผาที่อุณหภูมิสูงเป็นเถ้านหินกลวง (Cenosphere)

### 2.6.3 ชนิดของเถ้านหิน

เถ้านหินเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อนมาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งเถ้านหินออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1) ชนิด F (Class F) เป็นเถ้านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส ปริมาตรรวมของซิลิกา (Silica) อะลูมินา (Alumina) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferricoxide) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 วิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311 โดยทั่วไปเถ้านหินชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้านหินแคลเซียมต่ำ สำหรับซิลิกา-ออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) มาจากรีดดินเหนียวและควอตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีรีดดินเหนียวสูงจึงให้เถ้านหินที่มีซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) สูง

2) ชนิด C (Class C) เป็นเถ้านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) สูงและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 เถ้านหินชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า เถ้านหินแคลเซียมสูง สำหรับอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) มาจากรีดดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ต่ำทำให้เถ้านหินชนิด C นอกจากมีซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ต่ำแล้วยังมีอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ต่ำด้วย

เถ้านหินทั้ง 2 ชนิดมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน นอกจากนี้เถ้านหินชนิด C ยังมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเองจากการมีปริมาณ CaO สูง เถ้านหินแม่เมาะในระยะแรกส่วนใหญ่เป็นเถ้านหินแคลเซียมสูงโดยมีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง ในปัจจุบันเถ้านหินแม่เมาะมีปริมาณ CaO ต่ำลงโดยมีสารนี้อยู่ประมาณร้อยละ 10 [17,18]

นอกจากนี้แล้วยังมีข้อกำหนดที่เหมือนกันของเถ้านหินชั้น F และชั้น C คือ กำหนดให้มีปริมาณ  $\text{SO}_3$  ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI, Loss on Ignition) ไม่เกินร้อยละ 6 โดยน้ำหนักสำหรับชั้น C ส่วนชั้น F ไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก และเมื่อนำมาร้อนผ่านน้ำด้วยตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ซึ่งมีขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร ต้องมีอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงไม่เกินร้อยละ 34 ของน้ำหนักทั้งหมด ส่วนกำลังอัดคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานต้องให้กำลังที่อายุ 7 หรือ 28 วัน ไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของกำลังอัดคอนกรีตควบคุม (คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานทั้งหมด)

#### 2.6.4 รูปร่างและลักษณะของเถ้านหิน

เมื่อเถ้านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้ ถ่านหินจะสันดาปและหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง เถ้านหินจะเริ่มเย็นลงหลังจากออกจากเตาเผา ผลจากการที่หลอมละลายทำให้เถ้านหินที่ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะทรงกลมและอยู่ในสถานะแก้ว (Glassy Phase) เถ้านหินส่วนหนึ่งเกิดจากการปะทะกันของเถ้านหินขนาดเล็ก ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ขนาดยังคงไม่ใหญ่มากนัก จึงสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ ทั้งนี้เถ้านหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูเล็กๆที่ผิว เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอน (Carbon) สูง เถ้านหินขนาดเล็กจะผ่านจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า และจะมีทรงกลมและผิวเรียบ

เถ้านหินยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกว่าซีโนสเฟีย (Cenosphere) ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในเถ้านหิน และยังมีเถ้านหินกลวงที่มีอนุภาคเถ้านหินเล็กๆ อยู่ภายในเรียกว่าพลีโรสเฟีย (Plerosphere) เถ้านหินกลวงมีตั้งแต่ขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายร้อยไมครอน องค์ประกอบหลักของเถ้านหินกลวงคือ แก้วอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate Glass) เนื่องจากเถ้านหินกลวงเป็นเถ้านหินที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติด้านการทนไฟและมีน้ำหนักเบาจึงได้มีการศึกษาเพื่อนำเถ้านหินกลวงมาใช้ประโยชน์ในด้านคอนกรีตน้ำหนักเบา และคอนกรีตที่มีคุณสมบัติด้านการทนไฟ และการเก็บเสียง (Acoustic)

เถ้านหินที่ได้จากการเผาในระบบฟลูอิดไคซ์เบด มีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและผิวขรุขระเนื่องจากอุณหภูมิในการเผาไม่สูงพอ ถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน ส่วนเถ้านหินกันเตาเกิดจากการปะทะกันของอนุภาคถ่านหิน จึงมีรูปร่างไม่แน่นอนและผิวขรุขระเช่นกัน

#### 2.6.5 ขนาดและความละเอียด

อนุภาคเถ้านหินโดยทั่วไปมีความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์เล็กน้อย ลักษณะส่วนใหญ่เป็นรูปทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน โดยมี

ขนาดเฉลี่ยประมาณ 15 ถึง 30 ไมครอน ความละเอียดของถ้ำถ่านหินขึ้นอยู่กับการบดถ่านหิน ชนิดของเครื่องบด และชนิดของเตาเผา ถ่านหินที่เผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเตาเผาจะมีความละเอียดสูงและมีทรงกลม แต่ถ่านหินที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ รูปร่างของถ้ำถ่านหินจะไม่แน่นอน ถ้ำถ่านหินที่ละเอียดจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นทำให้กำลังอัดคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ถ้ำถ่านหินที่หยาบกว่า

การวัดความละเอียดของถ้ำถ่านหินยังนิยมใช้การวัดแบบง่ายโดยการร่อนเปียก (Wet Sieve) ผ่านบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มาตรฐาน ASTM C 618 แนะนำให้ใช้บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 45 ไมครอน) โดยระบุจำนวนถ้ำถ่านหินที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 ถ้ำถ่านหินโดยทั่วไปมีปริมาณค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 8 – 30

สามารถหาความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) ของถ้ำถ่านหินได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์มาตรฐาน ASTM C188 ถ้ำถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 1.9 - 2.9 ซึ่งต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความถ่วงจำเพาะของถ้ำถ่านหินที่สูงส่วนใหญ่มาจากถ่านหินที่มีธาตุเหล็กและแคลเซียมออกไซด์ผสมอยู่มาก ความถ่วงจำเพาะของถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาครั้งเดียวกันยังขึ้นอยู่กับความละเอียด ถ้ำถ่านหินส่วนละเอียดจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าถ้ำถ่านหินส่วนที่หยาบ ทั้งนี้เนื่องจากถ้ำถ่านหินหยาบจะมีผิวขรุขระเป็นรูโพรงและยังมีถ้ำถ่านหินกลวงผสมอยู่มากกว่าถ้ำถ่านหินละเอียด

#### 2.6.6 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบหลักของถ้ำถ่านหินคือ ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ เฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดขึ้นอยู่กับ ชนิดของถ้ำถ่านหิน อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมขณะเผา ASTM C 618 จึงแบ่งถ้ำถ่านหินออกเป็น 2 ประเภท คือ ชนิด F และ ชนิด C โดยถ้ำถ่านหิน ชนิด F มีปริมาณ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ส่วนที่ถ้ำถ่านหิน ชนิด C มีผลรวมของปริมาณ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก ส่วนใหญ่ถ้ำถ่านหินชนิดแอนทราไซต์ (anthracite) และบิทูมินัส (bituminous) เมื่อเผาแล้วจะได้ถ้ำถ่านหินชนิด F โดยทั่วไปถ้ำถ่านหิน ชนิด F จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ค่อนข้างต่ำ คือ น้อยกว่า ร้อยละ 5 ซึ่งบางครั้งเรียกว่า Low-Calcium Fly Ash ส่วนถ้ำถ่านหินซับบิทูมินัส (sub-bituminous) และถ้ำถ่านหินลิกไนต์ (lignite) เมื่อเผาแล้วจะได้ถ้ำถ่านหิน ชนิด C เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งถ้ำถ่านหิน ชนิด C จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ มากกว่าร้อยละ 10 ถือว่าเป็นถ้ำถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมสูง (High-Calcium Fly Ash) ซึ่งอาจจะมีคุณสมบัติของซีเมนต์ร่วมกับคุณสมบัติปอซโซลานในตัวเอง

โดยทั่วไปถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำจะมีปริมาณคาร์บอนต่ำ (ต่ำกว่าร้อยละ 1) และหากถ่านหินมีปริมาณแคลเซียมสูงจะมีปริมาณคาร์บอนสูงเช่นกันซึ่งอาจสูงถึงร้อยละ 10 ดังนั้นมาตรฐานจึงกำหนดให้สามารถใช้ถ่านหิน ชนิด F ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูงถึงร้อยละ 12 ได้ ถ้ามีผลการใช้งานหรือผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือ เนื่องจากคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่ทำให้ถ่านหินมีลักษณะเป็นรูพรุน (cellular) มีพื้นที่ผิวสูงทำให้สามารถดูดน้ำได้มาก และทำให้ความต้องการน้ำสูงขึ้น นอกจากนี้ยังดูดซับสารเคมีผสม ทำให้ต้องใช้สารเคมีผสมเพิ่มมากขึ้น

การผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง กากที่เหลือจากการเผาถ่านหินประกอบด้วยถ่านหินประมาณร้อยละ 80 และถ่านหินเตาอีกประมาณร้อยละ 20 และประมาณว่ามีถ่านหินลิกไนต์ที่ได้จากการเผาถ่านหินเฉพาะที่แม่เมาะถึงปีละ 3 ล้านตันในปี พ.ศ.2536 นอกจากนี้ยังมีถ่านหินจากแหล่งภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือปีละประมาณ 2.8 แสนตันต่อปี และมีการนำถ่านหินจากทุกแหล่งไปใช้ในงานคอนกรีตประมาณปีละ 1.5 ล้านตันในปี พ.ศ. 2546

ถ่านหินแม่เมาะมีขนาดและมีความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความละเอียดของถ่านหินนิยมนำมาวัดโดยใช้การวัดพื้นที่ผิว โดยถ่านหินส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 2,500 ถึง 5,000 ซม.<sup>2</sup> /ก. เมื่อวัดโดยวิธีของเบลน (Blaine) และเมื่อวัดโดยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) ซึ่งเป็นการวัดการดูดซับของก๊าซ ความละเอียดของถ่านหินเมื่อวัดโดยวิธีนี้จะได้ค่าที่แตกต่างกันมาก เนื่องจากวิธีนี้วัดพื้นที่ผิวทั้งหมดที่ก๊าซสามารถแทรกเข้าถึงได้ ทั้งผิวที่ขรุขระเป็นรูพรุนและที่เป็นโพรง ค่าที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 5,000 ถึง 89,000 ซม.<sup>2</sup> /ก. โดยค่าเฉลี่ยประมาณ 35,000 ซม.<sup>2</sup> /ก.

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเกี่ยวกับความคงทนของคอนกรีตในงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นที่ยอมรับว่า ถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานที่สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน แล้วทำให้คอนกรีตมีสมบัติด้านความคงทนที่ดีขึ้น เช่น ป้องกันการทำลายเนื่องจากสารละลายซัลเฟตได้ดี คอนกรีตมีความทึบน้ำสามารถป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปทำความเสียหายให้กับเหล็กเสริมได้ ตลอดจนปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในช่วงหลัง ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตมีการพัฒนาต่อเนื่องและลดการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ Thomas และคณะ (2004) ได้ทำการเก็บข้อมูลคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี คอนกรีตดังกล่าวแช่น้ำทะเลอยู่ที่ Building Research Establishment (BRE) บริเวณปากแม่น้ำ Thames Estuary เมือง Shoeburyness ประเทศอังกฤษ มีปริมาณ

สารประกอบคลอไรด์และซัลเฟตใกล้เคียงกับน้ำทะเลในประเทศไทย แต่น้ำทะเลที่ประเทศอังกฤษมีอุณหภูมิ  $10^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีความแตกต่างจากอุณหภูมิของน้ำทะเลในเขตพื้นที่ร้อนชื้นอย่างประเทศ ผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินช่วยต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ในคอนกรีตได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน และการบ่มคอนกรีตให้นานขึ้น มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์เพียงเล็กน้อยเมื่อคอนกรีตนั้นแช่อยู่ในน้ำทะเลเป็นเวลานาน ขณะที่ผลของการเพิ่มกำลังอัดที่มีต่อการต้านทานคลอไรด์ มีอิทธิพลน้อยกว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในปฏิภาคส่วนผสม ส่วนการศึกษาความคงทนของคอนกรีตในเขตทะเลที่อยู่ในประเทศไทย ซึ่งเป็นเขตร้อนชื้น Chalee และคณะ (2010) ได้เก็บข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในน้ำทะเลถึง 10 ปี ซึ่งพบว่า ผลการศึกษามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับข้อมูลด้านความคงทนที่ศึกษาในสิ่งแวดล้อมทะเลที่เป็นเขตอบอุ่น โดยการใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีความคงทนเนื่องจากน้ำทะเลมากขึ้น นอกจากนั้นคอนกรีตที่ต้องใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลควรมีการกักเก็บคลอไรด์ที่ดี ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่จะมาทำลายเหล็กเสริมมีปริมาณน้อยลงและทำให้การเกิดสนิมเหล็กน้อยลงด้วย โดย Cheewaket และคณะ (2010) ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเลซึ่งพบว่า การเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในคอนกรีต ส่งผลให้ค่าร้อยละการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานไม่มีผลชัดเจนกับการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีต นอกจากนั้น การเลือกใช้คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลต้องคำนึงถึงระดับคลอไรด์วิกฤติซึ่งเป็นปริมาณคลอไรด์รอบผิวเหล็กเสริมที่ส่งผลให้เริ่มเกิดการกัดกร่อน โดยทั่วไปคอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มมีการกัดกร่อนเมื่อปริมาณคลอไรด์มีค่าเกินร้อยละ 0.2 ถึง 0.7 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีประโยชน์ในการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างสถานะของการกัดกร่อนเริ่มต้นของเหล็กที่เสริมในคอนกรีต กับปริมาณของคลอไรด์อิสระรอบผิวของเหล็กเสริม ซึ่งจะมีผลสืบเนื่องในการพิจารณาความเสี่ยงของการกัดกร่อนในเหล็กเสริมเมื่อทราบปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีต โดย วิเชียร และ ชัย (2554) พบว่า ระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตลดลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้นและชัดเจนในกลุ่มคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง มากกว่าในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ถึงแม้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน แต่การเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตธรรมดากลับมีมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีความทึบน้ำ และมีสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา จึงสามารถลดปริมาณของคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินได้อย่างชัดเจน วิเชียร และ

คณะ (2553) ได้ศึกษาผลของเถ้านหิน 3 แหล่งต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล ซึ่งพบว่า การใช้เถ้านหินชนิด F ที่ได้จากโรงงานโดยตรง (รูปร่างกลมตัน) จากแม่เมาะให้ผลในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าเถ้านหินบดละเอียดชนิด C (รูปร่างไม่แน่นอน) จาก เอ็น พี เอส และ กาญจนบุรี อย่างไรก็ตาม คอนกรีตที่ผสมเถ้านหินทั้ง 3 แหล่งในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าลดลง และต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมเถ้านหิน

วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554) ได้ศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ที่ผสมเถ้านหินที่แช่ในสถานะแวดล้อมทะเล ทำการหล่อคอนกรีตควบคุมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.65 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ด้วยเถ้านหินแม่เมาะในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ในคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200 มม. ให้มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. นำคอนกรีตไปบ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลบแห้ง ที่ จ.ชลบุรี และเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ และวัดการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่อายุ 3 ปี ผลการวิจัยพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้านหินทุกส่วนผสมสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว คอนกรีตที่เพิ่มปริมาณเถ้านหินในส่วนผสมมากขึ้น สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนในเหล็กเสริมได้ดีขึ้น นอกจากนี้พบว่า คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้านหินสามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสถานะแวดล้อมทะเลได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้านหิน

วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554) ได้ศึกษาผลของเถ้าเกลบเปลือกไม้และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสถานะแวดล้อมทะเล โดยใช้คอนกรีตควบคุมทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ใช้เถ้าเกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียด แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200 มม. และบ่มคอนกรีตในน้ำจืดมีอายุครบ 28 วัน หลังจากนั้น นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสถานะแวดล้อมทะเล และเก็บตัวอย่างคอนกรีตมาจะทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ใช้กรดทำละลาย) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (ใช้น้ำทำละลาย) ใน

คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ผลการวิจัยพบว่า ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีต อย่างไรก็ตาม การแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ปริมาณสูงในคอนกรีต (แทนที่ร้อยละ 50) กลับส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์มีค่าลดลง นอกจากนี้พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงขึ้น

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า เถ้าถ่านหินให้ผลดีที่ชัดเจนต่อการป้องกันการทำลายเนื่องจากน้ำทะเล และผลการศึกษาลำดับต่อไปจะใช้เวลาแช่น้ำทะเลไม่เกิน 10 ปี แต่ระยะเวลาที่โครงสร้างคอนกรีตอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่นานขึ้น อาจส่งผลต่อกลไกการทำลายที่แตกต่างจากช่วงอายุต้นๆ ได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่แช่บริเวณชายฝั่งทะเลซึ่งสัมผัสกับสภาวะเปียกสลับแห้งนานถึง 15 ปี

## บทที่ 3

### วิธีการศึกษา

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม มอก.15-2532
2. หิน ใช้หินคละที่มีขนาดใหญ่ที่สุด 19 มิลลิเมตร
3. ทราย ใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4
4. แก้วถ่านหิน ใช้แก้วถ่านหินลิกไนต์จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
5. เหล็กเส้นกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร ผึงไว้ในก้อนตัวอย่าง
6. สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ มีโพแทสเซียมโครเมต ( $K_2CrO_4$ ), ซิลเวอร์ไนเตรต ( $AgNO_3$ ), กรดไนตริก ( $HNO_3$ ), โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $NaHCO_3$ ) และแคลเซียมคาร์บอเนต ( $CaCO_3$ )
7. น้ำ ใช้น้ำสะอาด การทดลองนี้ใช้น้ำประปา

#### 3.2 อุปกรณ์การทดสอบและเครื่องมือ

1. กระดาษทราย ใช้ขัดสนิมของเหล็ก หรือกระดาษแผ่นใสที่มีสเกลเท่ากับ  $1 \times 1 \text{ mm}^2$
2. ครกหิน ใช้สำหรับตอกคอนกรีตที่บริเวณเหล็กที่ผึง เพื่อเอาไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กเสริม โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ดังรูปที่ 3.1(ก)



(ก) ครกหิน



3. เครื่องชั่งน้ำหนัก ดังรูปที่ 3.1(ข)



(ข) เครื่องชั่งน้ำหนัก

4. เครื่องทดสอบกำลังอัด (Universal Testing Machine)

เครื่องทดสอบกำลังอัดยี่ห้อ ELE ขนาด 300 ตัน ดังรูปที่ 3.1(ค)



(ค) เครื่องทดสอบกำลังอัด

### 5. เครื่องเจาะคอนกรีต

เครื่องเจาะคอนกรีตชนิดไฟฟ้า สามารถเจาะคอนกรีตแบบเปียกได้ ดังรูปที่ 3.1(ง)



(ง) เครื่องเจาะคอนกรีต

### 6. เครื่องตัดคอนกรีต

เครื่องตัดคอนกรีตไฟฟ้าขนาดใบพัด 16 นิ้ว ใบทำจากกากเพชรสามารถตัดแบบแห้งและแบบเปียกได้ ดังรูปที่ 3.1(จ)



(จ) เครื่องตัดคอนกรีต

7. เครื่องทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของคอนกรีต ด้วยเทคนิค scanning electron microscopy และ energy dispersive spectroscopy (SEM - EDX) ดังรูปที่ 3.1(ฉ)



(ฉ) เครื่องทดสอบของเทคนิค (SEM - EDX)

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบ

### 3.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบเมื่อ 15 ปีที่แล้ว

#### 3.3.1 ส่วนผสมคอนกรีต

การศึกษานี้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55, และ 0.65 และใช้เส้นใยคาร์บอนไม่ผ่านการแยกขนาด (O) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35, และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่วนคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ไม่มีการผสมด้วยเส้นใยคาร์บอน ดังนั้นมีคอนกรีตในงานวิจัยนี้ 15 ส่วนผสม แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสม	เถ้าถ่านหิน (ร้อยละ)	ส่วนผสมคอนกรีต (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)					W/B
		ปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน	มวลรวม ละเอียด	มวลรวม หยาบ	น้ำ	
I45	0	478	-	639	1,024	215	0.45
I45O15	15	406	72	639	1,004	215	0.45
I45O25	25	359	119	639	990	215	0.45
I45O35	35	311	167	639	977	215	0.45
I45O50	50	239	239	639	957	215	0.45
I55	0	478	-	639	971	262	0.55
I55O15	15	406	72	639	948	262	0.55
I55O25	25	359	119	639	933	262	0.55
I55O35	35	311	167	639	918	262	0.55
I55O50	50	239	239	639	897	262	0.55
I65	0	478	-	639	922	311	0.65
I65O15	15	406	72	639	898	311	0.65
I65O25	25	359	119	639	881	311	0.65
I65O35	35	311	167	639	864	311	0.65
I65O50	50	239	239	639	840	311	0.65

ความหมายของสัญลักษณ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีความหมายดังนี้

I	หมายถึง	คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
O	หมายถึง	เถ้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการแยกขนาด
45, 55, 65	หมายถึง	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55, และ 0.65 ตามลำดับ
15, 25, 35, 50	หมายถึง	คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ I ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35, และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ

### ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

“I45”	หมายถึง	คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45
“I45O15”	หมายถึง	คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินที่ไม่ผ่านการแยกขนาดร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

#### 3.3.2 การหล่อตัวอย่างคอนกรีต

เมื่อ 15 ปีที่แล้วได้มีการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 200×200×250 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ตามสัดส่วนผสมในตารางที่ 3.1 หลังจากหล่อคอนกรีตและบ่มจนอายุครบ 28 วัน จึงได้นำไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกและแห้งตามน้ำขึ้น-ลงเป็นระยะเวลา 15 ปี ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และเก็บตัวอย่างคอนกรีตเข้ามาในห้องปฏิบัติการคอนกรีต เพื่อเจาะทดสอบกำลังอัด การกัดกร่อนเหล็กเสริม ปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต และโครงสร้างทางจุลภาค หลังนำคอนกรีตแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี



รูปที่ 3.2 สถานที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี

### 3.4 วิธีการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการเจาะเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้น้ำและกรดเป็นตัวทำละลาย ทดสอบกำลังอัด การกักครองเหล็กเสริม ปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต และ โครงสร้างทางจุลภาค หลังนำคอนกรีตแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี

#### 3.4.1 ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเจาะตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้กรดและน้ำเป็นตัวทำละลายเพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และคลอไรด์อิสระ ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนดังนี้

##### ก) การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

1) นำคอนกรีตขนาด  $200 \times 200 \times 250$  มม.<sup>3</sup> ที่แช่ในน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งที่อายุครบ 15 ปีมาเจาะบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่าง โดยเจาะทะลุตัวอย่างทดสอบ ซึ่งจะได้ตัวอย่างคอนกรีตที่เจาะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. และยาว 200 มม. ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การเจาะตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

2) นำตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะมาตัดเป็นชั้นจากผิวหน้าคอนกรีตลึกลงไปถึงกึ่งกลาง โดยตัดตัวอย่างให้หนาชั้นละ 10 มม. (ทั้งหมดประมาณ 10 ชั้น) ดังนั้นในคอนกรีตทรงลูกบาศก์ 1 ก้อน จะได้ตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่ความลึกเดียวกัน 2 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การตัดตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

3) บดตัวอย่างที่ได้จากการตัดแต่ละชั้นให้ละเอียด โดยนำผงคอนกรีตส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปทำการไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดและน้ำเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM 1152 และ ASTM C1218 ตามลำดับ เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระ ตามลำดับ (รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

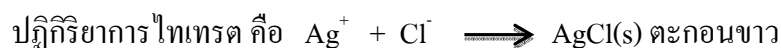
ข) การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

1) การไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid soluble)

การไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ด้วยกรดตามมาตรฐาน ASTM C 1152 หาได้โดยนำตัวอย่าง 10 กรัม, กรดไนตริก (1:1) 25 มล. และน้ำกลั่น 75 มล. ผสมในบีกเกอร์ จากนั้นปิดด้วยกระดาษฟิกันนำไปต้มประมาณ 3 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวด้วยอุณหภูมิต่ำ จากนั้นนำมากรองด้วยกรวยกรองโดยใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น นำตัวอย่างที่ได้มาทำการเจือจาง 5 เท่า (เนื่องจากคลอไรด์มีความเข้มข้นสูง) แล้วคูดตัวอย่างที่เจือจางแล้วใส่ขวดชมพู 2 ขวด ขวดละ 10 มล, เติม  $K_2CrO_4$

5% 1 มล. และ  $\text{NaHCO}_3$  2% 10 มล. ทั้ง 2 ตัวอย่าง เขย่าให้มีการตกตะกอน จากนั้นนำมาหยดด้วยซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) จนเกิดเป็นสีส้ม (จุดยุติ) บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตของจากบิวเรตต์ เพื่อคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในแต่ละชั้นความลึกตามวิธีของมอร์ (Mohr's method) ดังนี้

การไทเทรตด้วยซิลเวอร์ไอออนตามวิธีของมอร์ (Mohr's method) โดยวิธีนี้จะเกิดตะกอนที่มีสีแดงของเกลือที่ไม่ละลาย ณ จุดยุตินิยมใช้การไทเทรตหาคลอไรด์ด้วยสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต โดยการเติมโครเมตไอออน ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) ซึ่งเป็นอินดิเคเตอร์ในสารละลายที่เป็นกลางของสารละลายตัวอย่างคลอไรด์ เมื่อไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต จะเกิดตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ ( $\text{AgCl}$ ) ก่อน เมื่อตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ตกสมบูรณ์แล้ว หยดต่อไปของซิลเวอร์ไนเตรตจะทำให้เกิดตะกอนสีแดงของ  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$  ซึ่งละลายได้มากกว่าตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์



การเตรียมสารละลาย  $\text{AgNO}_3$  ที่เข้มข้น เท่ากับ 0.05 M

เนื่อง  $\text{AgNO}_3$  เป็นสารที่ไม่เสถียร ดังนั้นต้องทำการเตรียมสารละลาย โดยใช้บิเกอร์

$$\text{จากสมการ ความเข้มข้น} \quad \left(\frac{\text{mol}}{\text{l}}\right) = \frac{\text{g}}{\text{Mw}} \times \frac{1000}{\text{V}}$$

$$\text{V} = \text{ml ที่ต้องการเตรียม, Mw ของ } \text{AgNO}_3 = 169.87 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

จากสมการจะได้ค่า g ซึ่งก็คือประมาณ  $\text{AgNO}_3$  ที่ต้องใช้

วิธีเตรียม ใช้บิเกอร์ เติมน้ำกลั่น ตามค่า V ที่ใช้ จากนั้นเติม  $\text{AgNO}_3$  ที่หามา คนจนละลายแล้วเก็บใส่ขวดสีชา

การเตรียมสารละลาย  $\text{NaCl}$  ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.05 M (500 ml)

สารละลาย  $\text{NaCl}$  0.05 M เอาไว้เทียบมาตรฐานหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย  $\text{AgNO}_3$

$$\text{NaCl มีมวลโมเลกุล (Mw) = } 58.5 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

ซึ่ง  $\text{NaCl}$  ประมาณ 1.46 กรัม คำนวณความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{NaCl}$



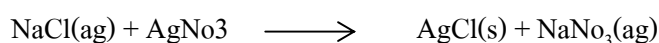
$$M_{NaCl} = \frac{g}{Mw} \times \frac{1000}{500}$$

$$= \frac{mol}{l} ?$$

เอาไปไทเทรตกับ  $AgNO_3$  เพื่อหาความเข้มข้นของ  $AgNO_3$  ที่แน่นอน

การเทียบมาตรฐานสารละลาย  $AgNO_3$

การคำนวณหา  $AgNO_3$  ที่แน่นอน จากสมการ



จากสมการ

$$\frac{mol NaCl}{mol AgNO_3} = \frac{1}{1}$$

$$mol NaCl = mol AgNO_3$$

$$(MV)_{NaCl} = (MV)_{AgNO_3}$$

$$M_{NaCl} \cdot V_{NaCl} = M_{AgNO_3} \cdot V_{AgNO_3}$$

$M_{NaCl}$  จากการคำนวณ,  $V_{NaCl}$  จาก ปิเปต 10 มล.

$$M_{AgNO_3} = ? \frac{mol}{l}$$

2) การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Water-soluble Chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218

- นำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัมโดยชั่งละเอียด 0.01 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- เติมน้ำปริมาณ 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์
- นำไปต้มให้เดือดประมาณ 5 นาที แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
- นำไปกรองผ่านกระดาษกรองใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น
- ปิเปตตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ไปใส่ในขวดทดลองรูปชมพู่
- เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2CrO_4$ ) 1 มิลลิลิตร แล้วนำไปไทเทรต
- ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $AgNO_3$ ) จนเป็นสีส้ม บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $AgNO_3$ ) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณ
- เตรียมการไทเทรตแบลนด์ โดยใช้สารละลายแคลเซียมคาร์บอเนต ( $CaCO_3$ ) 0.2 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ แล้วเติมน้ำกลั่นเท่ากับปริมาตรสุดท้ายในการไทเทรตตัวอย่าง แล้วเติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2CrO_4$ ) 5% ลงไป 1 มิลลิลิตร

9. ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) จนเป็นสี บันที่กปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ตามวิธีของมอร์ (Mohr's method) ดังที่กล่าวมาข้างต้น

#### 3.4.2 ทดสอบกำลังอัดเมื่อแช่คอนกรีตในน้ำทะเลนาน 15 ปี

1) นำคอนกรีตขนาด  $200 \times 200 \times 250$  มม.<sup>3</sup> ที่แช่ในน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งที่อายุครบ 15 ปีมาเจาะให้ทะลุตัวอย่างทดสอบ ซึ่งจะได้ตัวอย่างคอนกรีตที่เจาะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. และยาว 200 มม.

2) นำตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะมาตัดเป็น 2 ท่อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. และยาว 100 มม. แยกหัวตัวอย่างที่เจาะทั้ง 2 ด้าน ให้เรียบด้วยกำมะถัน และทดสอบกำลังอัดคอนกรีตด้วยเครื่อง Universal testing Machine หรือ Compression Machine การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่อายุแช่น้ำทะเล 15 ปี แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุแช่น้ำทะเล 15 ปี

#### 3.4.3 ทดสอบการกัดกร่อนเหล็กเสริม (Steel Corrosion)

1) นำคอนกรีตขนาด  $200 \times 200 \times 250$  มม.<sup>3</sup> ที่มีการฝังเหล็กที่มุม มากดดูการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตซึ่งมีระยะหุ้ม 10 20 50 และ 75 มม. โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดกดให้ก้อนคอนกรีตแตกออก

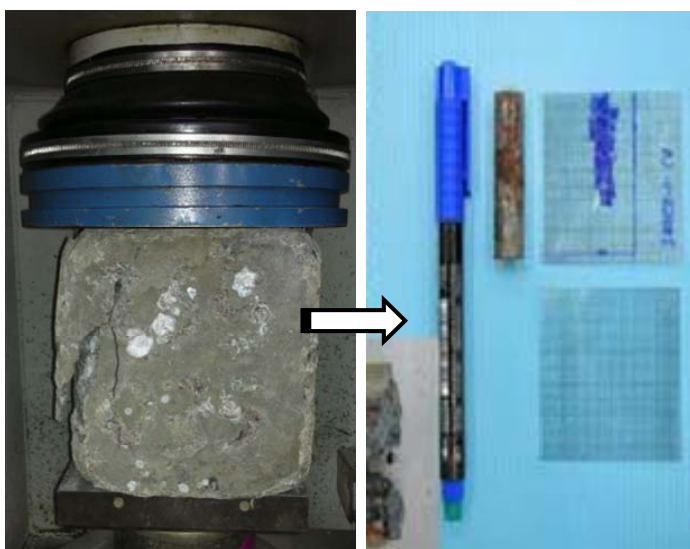
2) นำเหล็กออกมาทำการวัดพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กด้วยการทาพื้นที่ผิวเหล็กที่เป็นสนิมลงบนกระดาษกราฟใสซึ่งทำเป็นช่องขนาด 2 มม. x 2 มม. แล้วนับจำนวนช่องเพื่อหาพื้นที่การเกิดสนิมและคำนวณหาร้อยละของพื้นที่ที่เกิดสนิมเทียบกับพื้นที่ทั้งหมดดังสมการที่ 3.1

$$C, (\%) = \left( \frac{RA}{SA} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ $C$	คือ	ร้อยละของพื้นที่ผิวแห่งเหล็กที่เกิดสนิม
$RA$	คือ	พื้นที่ผิวแห่งเหล็กที่เกิดสนิม (ตารางมิลลิเมตร)
$SA$	คือ	พื้นที่ผิวทั้งหมดของแห่งเหล็ก (ตารางมิลลิเมตร)

3) วัดร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กโดยการชั่งน้ำหนักเหล็กเริ่มต้น และน้ำหนักเหล็กที่เหลือหลังจากขัดสนิมออก

4) ถ่ายรูปการเกิดสนิมในแต่ละระยะหุ้มของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต โดยรายละเอียดการทดสอบการเกิดสนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การทดสอบการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมแก้วนำหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี

#### 3.4.4 การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure)

เก็บตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะ โดยทำการบดคอนกรีตให้ละเอียดและส่งตัวอย่างทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของคอนกรีตด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) และ energy dispersive spectroscopy (EDX)

## บทที่ 4

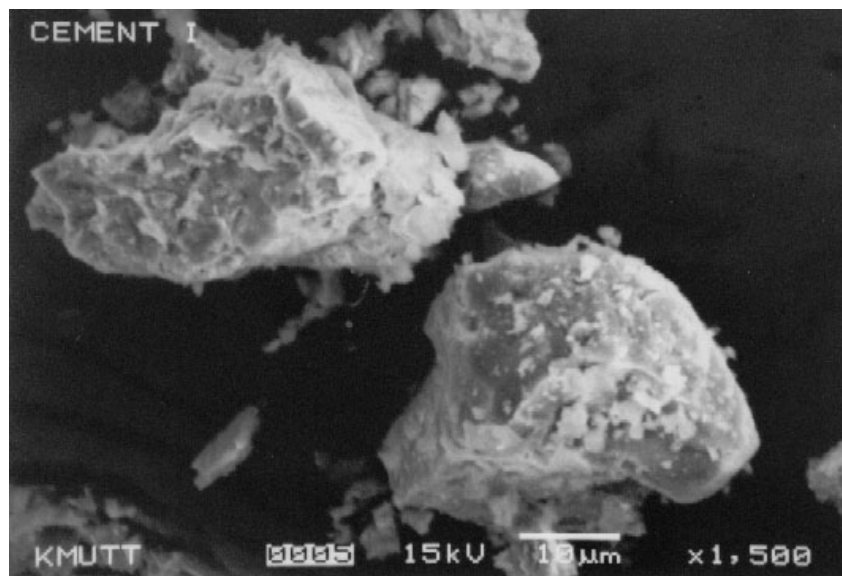
### ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

#### 4.1 สมบัติของวัสดุประสาน

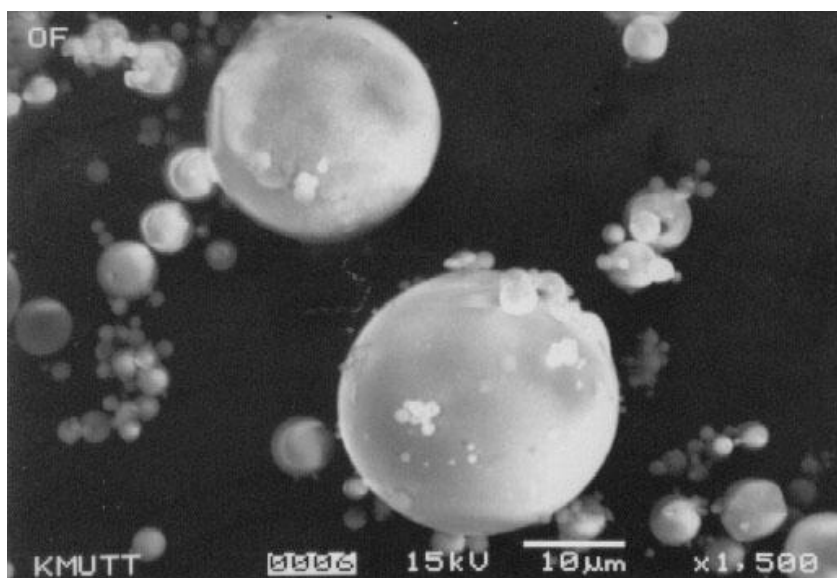
##### 4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ และเถ้าถ่านหิน

##### 4.1.1.1 รูปร่าง

เมื่อพิจารณารูปร่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าถ่านหินจากภาพถ่ายกำลังสูงด้วยเครื่อง SEM ในกำลังขยายต่างๆกันตามความเหมาะสมของขนาดอนุภาค ตามรูปที่ 4.1 เห็นได้ชัดเจนว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีรูปร่างเป็นก้อน เหลี่ยมมุม และมีผิวที่ขรุขระไม่เรียบ ส่วนเถ้าถ่านหินแม่เมาะแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า อนุภาคมีลักษณะทรงกลมตัน ผิวเรียบ มีขนาดเล็กและใหญ่กระจายอยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากการเผาถ่านหินด้วยเตาแบบ PCC (Pulverized Coal Combustion) ซึ่งใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,100 องศาเซลเซียส ในการเผาไหม้ ทำให้เถ้าถ่านหินเกิดการหลอมเหลวจนเป็นทรงกลมตัน



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 4.2 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

#### 4.1.1.2 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียด

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ปกติของ ปูนซีเมนต์คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 และเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23

เมื่อพิจารณาความละเอียดของวัสดุโดยการหาปริมาณอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) พบว่า เถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีปริมาณอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 32 เห็นได้ว่าปริมาณอนุภาคของ เถ้าถ่านหินแม่เมาะ ที่ค้ำบน ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดไว้ คือไม่เกินร้อยละ 34 ซึ่ง สามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ไม่ผ่านการแยกขนาด ซึ่งมีขนาดและละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อนุภาคเถ้าถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15 ถึง 30 ไมครอน โดยความละเอียดของเถ้าถ่านหินมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการทำปฏิกิริยาโดยเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงการพัฒนากำลังอัดในคอนกรีตจะเร็วขึ้นเพราะความละเอียดสูงก็หมายถึง มีพื้นที่ผิวมากในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของวัสดุประสาน

วัสดุประสาน	ความถ่วงจำเพาะ	ร้อยละค้ำ ตะแกรงเบอร์ 325
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	3.13	-
เถ้าถ่านหิน	2.23	32

#### 4.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ และเถ้าถ่านหิน ที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectroscopy พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มี  $MgO$ ,  $SO_3$ ,  $LOI$ ,  $C_3A$  และ  $C_4AF$  อยู่ในค่ามาตรฐานที่กำหนดของ ASTM C150 ซึ่ง  $C_3A$  ช่วยในการยึดจับคลอไรด์ และองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีปริมาณผลรวมของสารประกอบหลัก  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  และ  $Fe_2O_3$  เท่ากับร้อยละ 79.45 และมีค่า  $LOI$  ร้อยละ 0.52 โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี โดยน้ำหนัก (ร้อยละ)	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน
Silicon Dioxide, SiO <sub>2</sub>	20.80	44.95
Aluminum Oxide, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.50	23.70
Iron Oxide, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.16	10.80
Calcium Oxide, CaO	64.97	13.80
Magnesium Oxide, MgO	1.06	3.47
Sodium Oxide, Na <sub>2</sub> O	0.08	0.07
Potassium Oxide, K <sub>2</sub> O	0.55	2.38
Sulfur Trioxide, SO <sub>3</sub>	2.96	1.31
Loss On Ignition, LOI	2.89	0.52
Tricalcium Silicate, C <sub>3</sub> S	56.50	-
Dicalcium Silicate, C <sub>2</sub> S	17.01	-
Tricalcium Aluminate, C <sub>3</sub> A	9.23	-
Tetracalcium Aluminoferrite, C <sub>4</sub> AF	9.62	-

#### 4.1.3 คุณสมบัติของมวลรวม

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด ที่ใช้ในงานวิจัย แสดงผลดังตารางที่ 4.3 ซึ่งมวลรวมดังกล่าวอยู่ในช่วงของข้อกำหนดมวลรวมปกติ ตาม ASTM C33 ที่ใช้ในคอนกรีตโดยทั่วไป

ตารางที่ 4.3 สมบัติของมวลรวม

คุณสมบัติ	มวลรวม	
	มวลรวม หยาบ	มวลรวม ละเอียด
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.77	2.57
Apparent Specific Gravity	2.80	2.61
Absorption (%)	0.64	0.96
Fineness Modulus	6.66	2.63
Normal Maximum Size (mm)	19	-

#### 4.2 สมบัติของน้ำทะเล

จากการเก็บตัวอย่างน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา ในแต่ละช่วงเวลาที่คอนกรีตแช่อยู่ในน้ำทะเล พบว่า น้ำทะเลมีลักษณะใส ไม่มีสี มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.8 ถึง 8.2 ซึ่งมีความเป็นด่างอ่อนๆ ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของสถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล (2537) ที่รายงานว่า บริเวณชายฝั่งทะเลศรีราชามีค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 7.86 ถึง 8.63 ส่วนสารประกอบที่ปะปนในน้ำทะเล จะเห็นได้ว่า มีค่าอยู่ในระดับใกล้เคียงกับทะเลทั่วไป นั่นคือ ปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000 ถึง 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณซัลเฟตมีค่า 2,200 ถึง 2,600 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการสังเกตจะพบว่าปริมาณคลอไรด์จะมากกว่าซัลเฟตประมาณ 8 เท่า โดยปริมาณคลอไรด์ที่มีในน้ำทะเลส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบโซเดียมคลอไรด์ ประมาณร้อยละ 90 และอีกประมาณร้อยละ 10 เป็นสารประกอบแมกนีเซียมคลอไรด์ จากข้อกำหนดของ ACI 318-05 ที่ระบุว่า คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำที่มีซัลเฟตละลายอยู่ในปริมาณ 1,500 ถึง 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถือว่าคอนกรีตอยู่ในสภาวะที่อาจเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตอย่างรุนแรง นั่นคือน้ำทะเลบริเวณด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา มีผลกระทบต่อคอนกรีตในชั้นรุนแรง ACI จึงแนะนำให้ใช้คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำกว่า 0.45 และมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 310 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนคอนกรีตที่เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม



ACI จึงเสนอให้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.40 และมีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน

โดยทั่วไป ระดับน้ำทะเลบริเวณด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา ขึ้นและลง 2 รอบภายใน 1 วัน คือ มีระดับสูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตในช่วงเวลาเช้า จากนั้นระดับน้ำเริ่มลดลงในช่วงเวลาบ่ายจนคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง ช่วงเย็นระดับน้ำเริ่มเพิ่มสูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตอีกครั้ง และลดระดับลงในเวลากลางคืน ซึ่งในแต่ละฤดูกาล เวลานั้นขึ้น-ลง อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปบ้าง เช่น ช่วงฤดูหนาว ระดับน้ำที่สูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตจะมีระยะเวลายาวนานกว่าปกติ และลดระดับลงเพียงเล็กน้อย ทำให้บางครั้งคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งในช่วงเวลาสั้นมากหรือไม่ได้อยู่ในสภาพแห้งเลย

ตารางที่ 4.4 สมบัติของน้ำทะเล

Time	Parameters			
	Sample Condition	pH	Chloride, Cl <sup>-</sup> (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Sulphat, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (มิลลิกรัมต่อลิตร)
January 2001	Clear, No Color	8.2	18,000	2,200
October 2001	Clear, No Color	7.9	17,000	2,200
May 2002	Clear, No Color	8.2	16,000	2,500
September 2002	Clear, No Color	7.8	18,000	2,500
August 2003	Clear, No Color	7.9	17,000	2,200
December 2003	Clear, No Color	8.2	19,000	2,700
April 2004	Clear, No Color	8.2	16,000	2,500
Feb 2005	Clear, No Color	8.2	18,000	2,200
May 2008	Clear, No Color	8.1	17,500	2,300
September 2009	Clear, No Color	8.2	18,120	2,250
April 2010	Clear, No Color	8.1	18,910	2,610

#### 4.3 ลักษณะของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล

สภาพตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 15 ปี ดังรูปที่ 4.3 โดยสังเกตเห็นว่า ตัวอย่างคอนกรีตมีความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผิวนอกของคอนกรีต ซึ่งน่าจะเกิดจากการ

ทำลายทางชีวภาพของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในน้ำทะเล เช่น หอย เพรียง และตะไคร่น้ำที่ติดอยู่ตามผิวคอนกรีต ซึ่งความเสียหายดังกล่าวยังถือว่าไม่รุนแรงเนื่องจากเกิดที่ผิวหน้าคอนกรีตเท่านั้น นอกจากนี้มีร่องรอยความเสียหายที่เกิดจากการสึกกร่อนจากซัดสีของหิน กรวด ทราย และการกระแทกของคลื่น โดยสังเกตเห็นขอบและมุมของตัวอย่างคอนกรีตเกิดการแตกเล็กน้อย การทำลายที่ผิวหน้าของตัวอย่างคอนกรีตอาจเกิดจากการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตที่อยู่ในน้ำทะเลด้วย เนื่องจากผิวหน้าคอนกรีตมีลักษณะที่ขรุขระและถูกชะออกมาได้ง่าย อย่างไรก็ตามสภาพผิวหน้าคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินพบว่าไม่มีความแตกต่างกันถึงแม้จะแช่น้ำทะเลนานถึง 15 ปี



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลบแห้งเป็นเวลา 15 ปี

#### 4.4 การสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตเนื่องจากน้ำทะเล

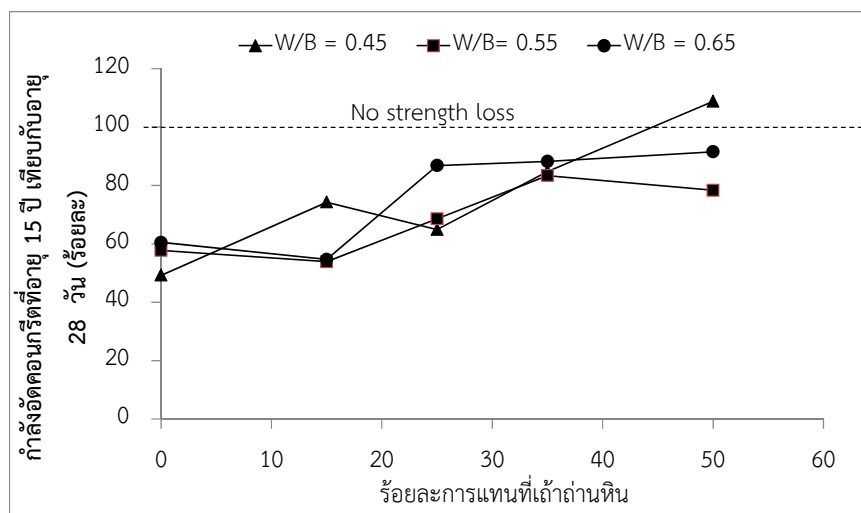
กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในน้ำทะเลในสภาพเปียกสลบแห้งเป็นเวลา 15 ปี แสดงดังตารางที่ 4.5 พิจารณาการสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตเนื่องจากน้ำทะเล ในรูปของร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลที่อายุ 15 ปี เทียบกับกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังรูปที่ 4.4 พบว่า ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตเกือบทุกส่วนผสมมีค่าร้อยละกำลังอัดที่อายุ 15 ปี เทียบกับอายุ 28 วัน ต่ำกว่า 100 (ยกเว้นคอนกรีต I45O50) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี คอนกรีตมีการสูญเสียกำลังอัดเมื่อเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (อายุ 28 วัน) โดยการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปีลดลง เช่น คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 และมี W/B เท่ากับ 0.45 มีร้อยละของกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 15 ปี เทียบกับ 28 วัน เท่ากับ 49.2 74.3 64.9 84.8 และ 108.8 ตามลำดับ และมีแนวโน้มเหมือนกันกับ

คอนกรีตที่มี W/B เท่ากับ 0.55 และ 0.65 นอกจากนั้นยังพบว่า การแทนที่เถ้าถ่านหินถึงร้อยละ 50 ส่งผลทำให้คอนกรีตทั้งสามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี มีร้อยละกำลังอัดเทียบกับ 28 วันสูงสุดซึ่งแสดงให้เห็นว่า เถ้าถ่านหินแม่เมาะมีคุณสมบัติที่ดี และสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ได้สมบูรณ์ส่งผลให้มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นในระยะยาว

การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตในปริมาณที่มากขึ้น ที่มีผลต่อการลดการสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหิน ทำให้ได้ C-S-H ซึ่งทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น (Neville,1996) นอกจากนั้นจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Jaturapitakkul et al., 2007 ; Miletic et al., 1999) พบว่า การใช้วัสดุปอซโซลานผสมในคอนกรีตมีผลให้ลดการทำลายเนื่องจากสารละลายซัลเฟตได้ดี ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตมีการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายซัลเฟตน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในครั้งนี้ที่พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น ที่แช่น้ำทะเลที่มีสารละลายซัลเฟตในระดับที่รุนแรง สามารถลดการสูญเสียกำลังอัดลงได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน ถึงแม้จะแช่น้ำทะเลนานถึง 15 ปี

ตารางที่ 4.5 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่น้ำทะเลในสภาพเปียก สลับแห้งเป็นเวลา 15 ปี

Mix	Compressive Strength (ksc)		
	28 days	15 years	15 years/28 days (%)
I45	514	253	49.2
I45O15	483	359	74.3
I45O25	461	299	64.9
I45O35	459	389	84.8
I45O50	345	375	108.8
I55	377	218	57.8
I55O15	326	176	53.9
I55O25	309	212	68.6
I55O35	333	278	83.4
I55O50	213	167	78.4
I65	296	179	60.5
I65O15	203	111	54.7
I65O25	214	186	86.9
I65O35	234	206	88.2
I65O50	169	155	91.6

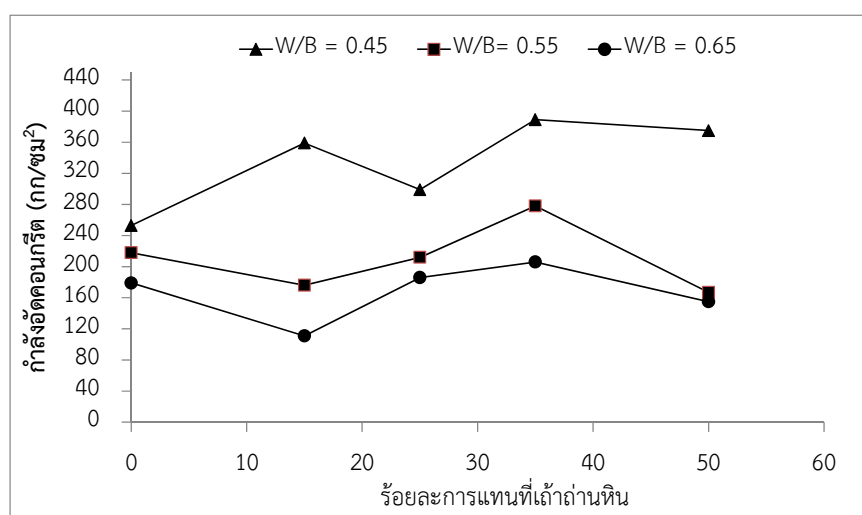


รูปที่ 4.4 ร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลที่อายุ 15 ปี เทียบกับกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

#### 4.5 ผลของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล

เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลาถึง 15 ปี ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่า ในคอนกรีตที่มีระดับกำลัง (strength grade) สูงสุด (W/B=0.45) เมื่อใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลมีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วนคอนกรีตที่มีระดับของกำลังต่ำลงมา (W/B= 0.55 0.65) พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตในปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานกลับทำให้กำลังอัดคอนกรีตมีแนวโน้มลดต่ำลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าถ่านหินปริมาณมาก (high volume fly ash) ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากกว่า 0.55 ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการป้องกันการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลเนื่องจากมีค่ากำลังอัดที่ต่ำ การที่เถ้าถ่านหินไม่สามารถปรับปรุงให้คอนกรีตที่มี W/B สูง จากการทำลายเชิงกลของน้ำทะเลได้ เป็นผลจากคอนกรีตที่มี W/B สูงมีความพรุนที่ค่อนข้างสูงอยู่แล้วจึงส่งผลให้สารละลายซัลเฟตสามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตและถูกทำลายได้ง่ายขึ้น แม้ว่าจะผสมเถ้าถ่านหินในคอนกรีตก็ไม่สามารถต้านทานการทำลายดังกล่าวได้อย่างเต็มที่ นอกจากนี้ในคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำ จะได้รับผลกระทบจากการทำลายทางกายภาพ (คลื่นกระแทก, การขัดสีกรวด ทลาย) ค่อนข้างชัดเจน ซึ่งเป็นผลให้เกิดการแตกร้าว เกิดความพรุนที่ถี่และหนาขึ้นให้เกิดการทำลายมากขึ้น ส่วนการใช้เถ้าถ่านหินในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ ซึ่งคอนกรีตมีความทึบน้ำและกำลังอัดสูงอยู่แล้ว จะทำให้เถ้าถ่านหินเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างสมบูรณ์และมีกำลังอัดที่สูงขึ้นได้ ประกอบกับคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงจะมีปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สูงตามไปด้วย จึงสามารถ

เข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาในเถ้าถ่านหินได้สมบูรณ์มากขึ้น อย่างไรก็ตามภาพรวมแล้วพบว่ากำลังอัดคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าถ่านหินที่มากขึ้นไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และคอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 35 มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 15 ปี สูงที่สุดของกลุ่มที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน ซึ่งอาจเป็นส่วนผสมของเถ้าถ่านหินในคอนกรีตที่เหมาะสมที่มีผลให้สมบัติเชิงกลที่ดีในการต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล โดยคอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 35 และมี W/B=0.45, 0.55 และ 0.65 มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 15 ปี เท่ากับ 389, 278 และ 206 กก./ซม.<sup>2</sup> ตามลำดับ



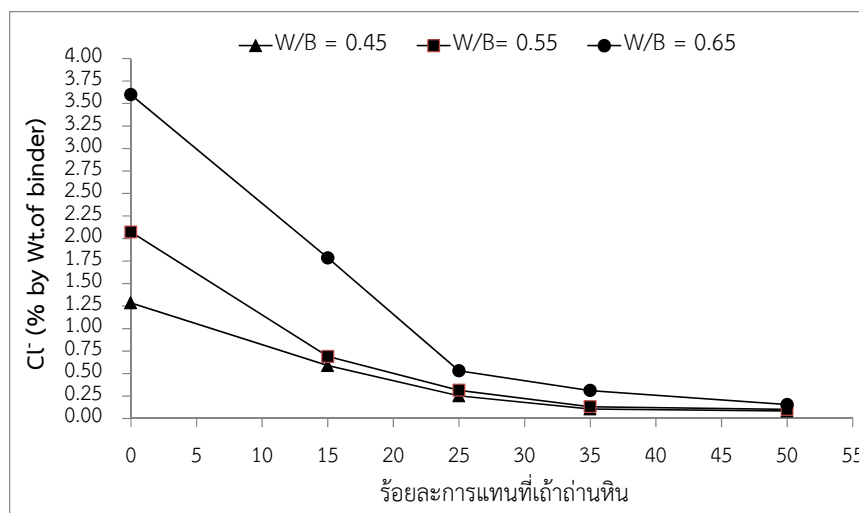
รูปที่ 4.5 ผลของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 15 ปี

#### 4.6 ปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

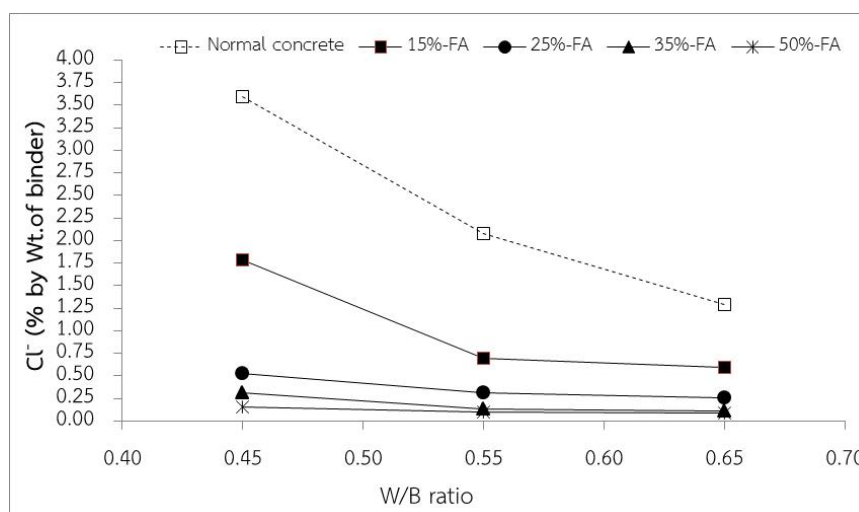
เมื่อพิจารณาปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ซึ่งเป็นคลอไรด์อิสระที่มีผลต่อการเร่งการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้มเหล็ก 95 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระลดลงอย่างชัดเจน โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ที่ร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีปริมาณคลอไรด์อิสระเท่ากับร้อยละ 1.29 0.59 0.25 0.11 และ 0.08 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินให้ผลชัดเจนที่ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้อย่างมาก ซึ่งผลดังกล่าวยังเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการศึกษาในสภาพแวดล้อมทะเล

จริง ในงานวิจัยที่ผ่านมา (Chalee and Jaturapitakkul, 2009) การลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเปลี่ยนต่างในคอนกรีตให้เป็นของแข็งที่มีความแข็งแรง และทำให้คอนกรีตที่บ่มน้ำลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้มากขึ้น (Neville, 1996) โดยเห็นผลชัดเจนในระยะเวลาที่ยาวนานซึ่งสอดคล้องกับอายุคอนกรีตที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ที่ยาวนานถึง 15 ปี นอกจากนี้ ผลของการอุดช่องว่างของอนุภาคเถ้าถ่านหินที่ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งเถ้าถ่านหินแม่เมาะมีอนุภาคที่กลมตันซึ่งส่งผลให้การอุดช่องว่างได้ดี และคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะถึงร้อยละ 50 จึงให้ผลในการต้านทานคลอไรด์ที่มากขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตผลตามรูปที่ 4.7 พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง มีผลต่อการลดปริมาณคลอไรด์อิสระ โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟ เช่น เมื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจาก 0.65 ลงเป็น 0.45 ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตธรรมดาตกลงเท่ากับร้อยละ 2.31 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ลดลงจากร้อยละ 3.60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่มี  $W/B=0.65$  เป็นร้อยละ 1.29 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่มี  $W/B=0.45$ ) ขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินสูงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบปริมาณคลอไรด์ลดลงเท่ากับร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ลดลงจากร้อยละ 1.60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่มี  $W/B=0.65$  เป็นร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่มี  $W/B=0.45$ ) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีต โดยคอนกรีตที่มีปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานลดลงสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้นอย่างชัดเจน ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่พบว่าการลดปริมาณน้ำลงไม่ได้ส่งผลให้การต้านทานคลอไรด์ดีขึ้นมากนัก เมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา อาจเป็นผลมาจากความทึบน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่ได้ขึ้นกับปริมาณน้ำในคอนกรีตเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับผลของการอัดแน่นของอนุภาคเถ้าถ่านหินด้วย ซึ่งจะขึ้นกับรูปร่างของเถ้าถ่านหิน โดยอนุภาคที่กลมตันของเถ้าถ่านหินแม่เมาะถือได้ว่าเป็นจุดเด่นในการอุดช่องว่างในคอนกรีต และลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.6 ผลของเถ้าถ่านหินต่อปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 15 ปี

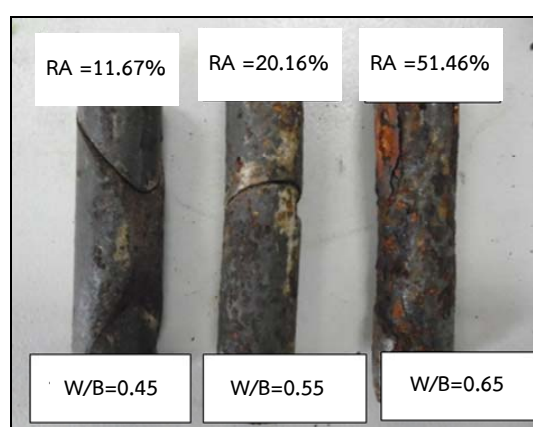


รูปที่ 4.7 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 15 ปี

#### 4.7 การกักร่อนของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต

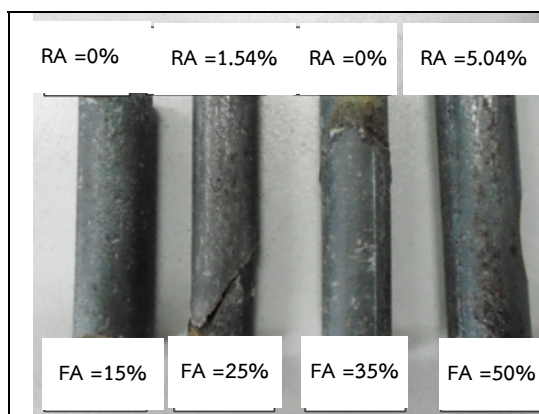
รูปที่ 4.8 แสดงการกักร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้ม 95 มม. หลังจากแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นระยะเวลา 15 ปี ซึ่งพบการเกิดสนิมเหล็กในทุกส่วนผสมน้อยมาก โดยเฉพาะในคอนกรีตที่มีระดับของกำลังอัดสูง (W/B=0.45) แทบจะไม่เห็นความแตกต่างระหว่างกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่ต่างกัน (รูปที่ 4.8ข) เมื่อพิจารณาการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตธรรมดา

รูปที่ 4.8(ก) เห็นได้ชัดว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณการเกิดสนิมมากขึ้นอย่างชัดเจน โดยคอนกรีตธรรมดาที่มี W/B เท่ากับ 0.45 0.55 และ 0.65 มีค่าร้อยละการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีต เท่ากับ 11.67 20.16 และ 51.46 ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับปริมาณคลอไรด์อิสระตามที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินส่งผลให้การเกิดสนิมในเหล็กลดลงต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน และการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้การเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง โดยเห็นผลในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง (W/B=0.65) ดังรูปที่ 4.8(ค) เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงถึง 0.65 ที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีร้อยละของพื้นที่การเกิดสนิมเหล็กเท่ากับ 16.18 5.73 1.50 และ 1.30 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบมากขึ้น สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ที่จะส่งผลทำให้เกิดสนิมในเหล็กลดลงได้ เนื่องมาจากปฏิกิริยาดังกล่าว ช่วยลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตที่ได้มาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำได้ และเปลี่ยนให้เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน ตลอดจนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ยังเป็นสารตั้งต้นที่ก่อให้เกิดการทำลายเนื่องมาจากซัลเฟตในน้ำทะเล โดยทำให้เกิดยิปซัมที่ละลายน้ำได้ และส่งผลให้คอนกรีตเกิดความพรุนมากขึ้น ดังนั้นปฏิกิริยาปอซโซลานจึงมีส่วนช่วยอย่างมาก ในการทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ และลดการซึมผ่านของสารเคมีที่จะเข้าไปทำอันตรายกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลได้ (Neville, 1996 ; Jaturapitakkul et al., 2007 ; Miletic et al., 1999)

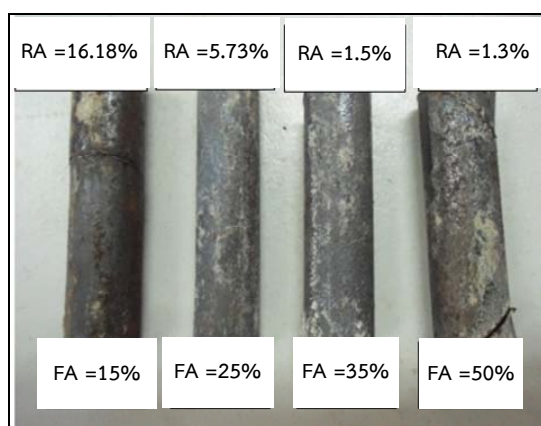


ก) คอนกรีตธรรมดา





ข) คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มี W/B=0.45



ค) คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มี W/B=0.65

รูปที่ 4.8 การกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้ม 95 มม. หลังจากแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียก สลับแห้งเป็นระยะเวลา 15 ปี

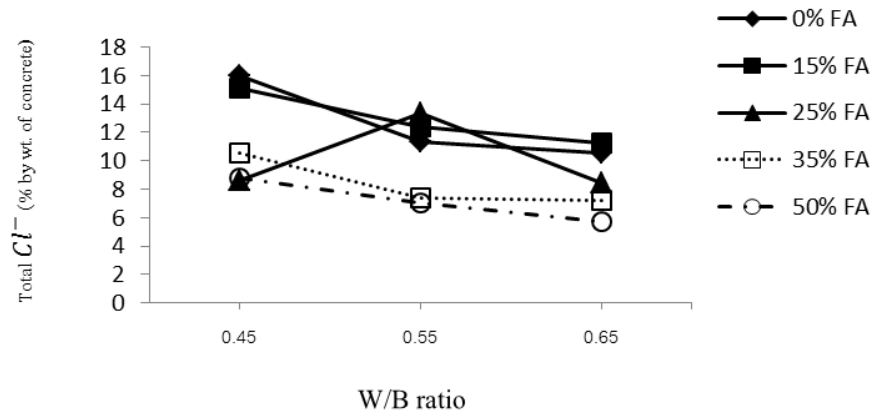
#### 4.8 การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีต

##### 4.8.1 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีต

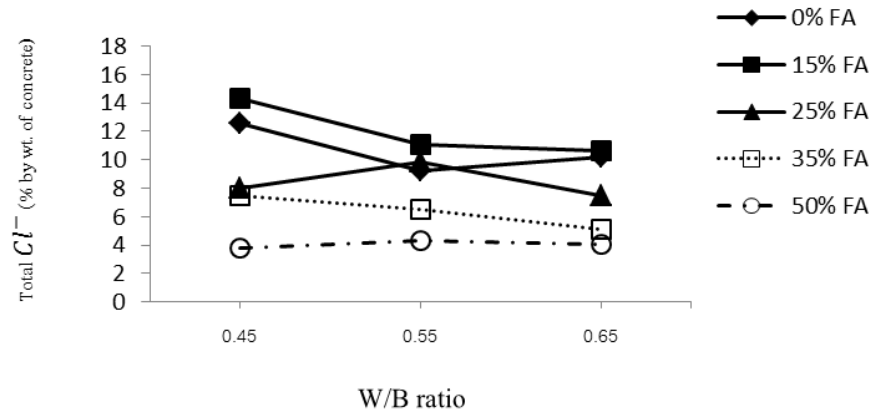
รูปที่ 4.9 แสดงปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี ที่ระดับความลึกต่างๆจากผิวคอนกรีต โดยที่ระดับความลึกใกล้ผิวหน้าคอนกรีต ได้รับผลกระทบทางกายภาพและเคมีทะเลมาก ปริมาณคลอไรด์จึงมีความแปรปรวนและไม่สามารถวิเคราะห์แนวโน้มที่ชัดเจนได้ ได้แก่ที่ระดับความลึก 5 15 และ 25 มม.จากผิวคอนกรีต เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึกมากขึ้น (35 มม.ขึ้นไป) พบว่า ในการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุที่ลดลงมีแนวโน้มทำให้การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงด้วย

เมื่อพิจารณาปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกจากผิวคอนกรีต 45 มม. ดังรูปที่ 4.9 (จ) พบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 0.55 และ 0.65 ที่ผสมเถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 1.37 2.38 และ 3.98 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ และที่ระดับความลึกจากผิวคอนกรีต 85 มม. ดังรูปที่ 4.9 (ฉ) ในตัวอย่างเดียวกัน (คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 0.55 และ 0.65 ที่ผสมเถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 0.43 0.51 และ 1.97 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาคอนกรีตแต่ละอัตราส่วนผสมและความลึกต่างๆ พบว่าแนวโน้มของปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ส่งผลให้สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้ดีขึ้น โดยมีแนวโน้มชัดเจนในคอนกรีตธรรมดาว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน (สังเกตจากความชันกราฟในคอนกรีตธรรมดาจะมีแนวโน้มมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน)

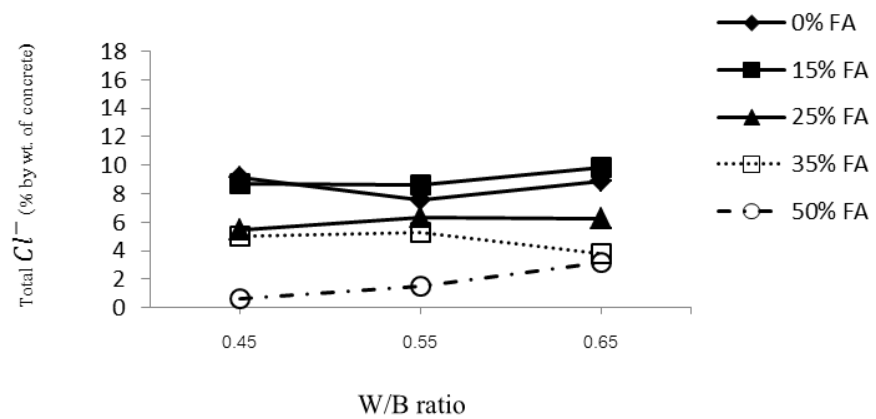
จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุที่ต่ำกว่า จะมีปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์ที่น้อยกว่า เป็นผลจาก การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ ส่งผลให้คอนกรีตมีรูพรุนน้อยลง ความทึบน้ำสูง และยังช่วยลดปัญหาการแตกร้าวเนื่องการหดตัวแบบแห้ง ปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต กล่าวคือ เมื่อคอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น น้ำหรือสารประกอบคลอไรด์ที่สามารถเข้าไปในเนื้อคอนกรีตก็จะแทรกซึมเข้าไปได้ยากขึ้น เนื่องจากภายในคอนกรีตไม่มีช่องว่างหรือมีช่องว่างน้อยมาก และการลดปริมาณน้ำในคอนกรีตส่งผลต่อการต้านทานคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน เป็นผลจากความทึบน้ำในคอนกรีตธรรมดาขึ้นกับปริมาณน้ำเป็นหลัก กล่าวคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ต่ำลง กำลังสูงขึ้น ความพรุนในคอนกรีตลดลง และสามารถต้านทานคลอไรด์ได้ดีขึ้น (Neville, 1996 ; กิริติกร และ วิเชียร, 2554 ; วิเชียร และ ชีรพงศ์, 2556) ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน ความพรุนของคอนกรีตไม่ขึ้นกับกำลังอัดอย่างเดียว แต่จะขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีและความละเอียดของเถ้านหินด้วย



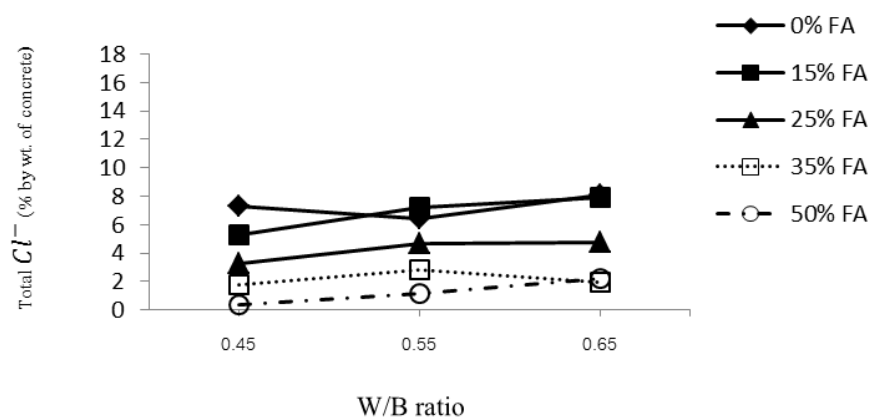
(ก) ความลึก 5 มม.



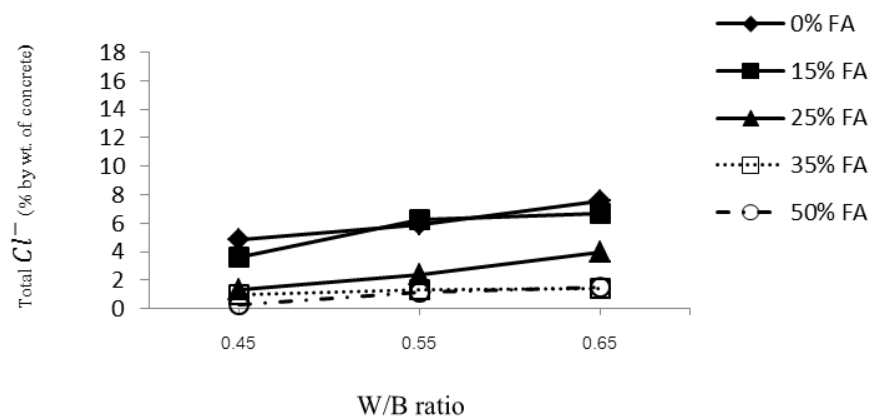
(ข) ความลึก 15 มม.



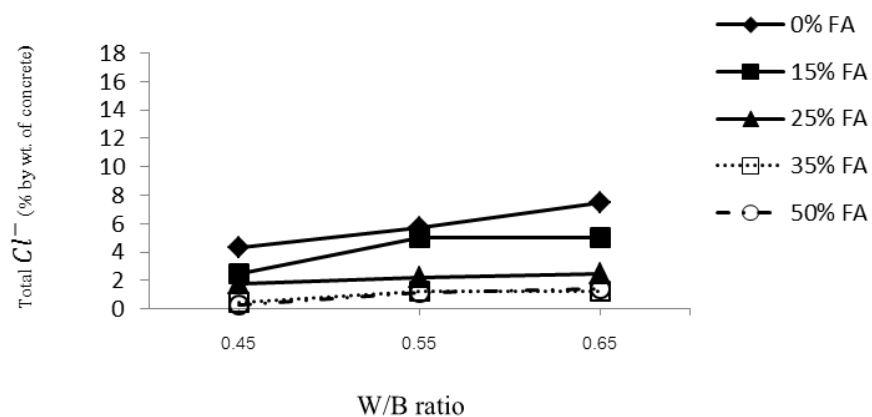
(ค) ความลึก 25 มม.



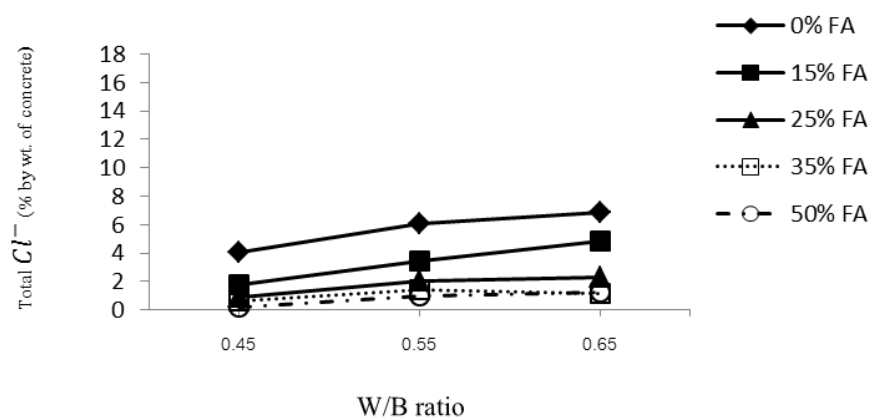
(ง) ความลึก 35 มม.



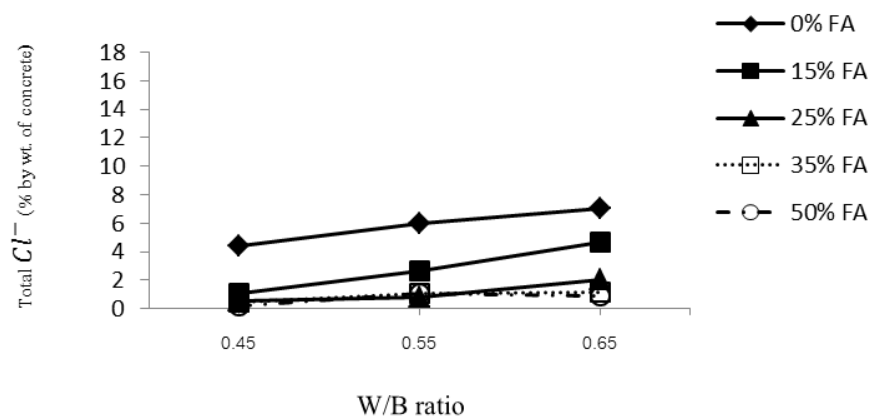
(จ) ความลึก 45 มม.



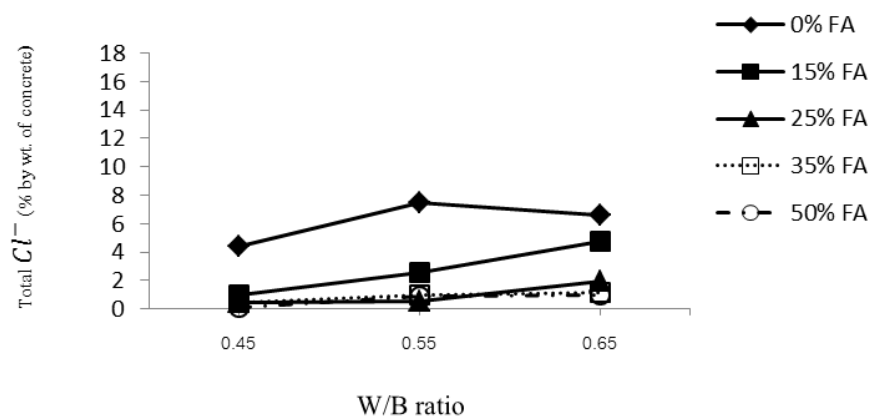
(ฉ) ความลึก 55 มม.



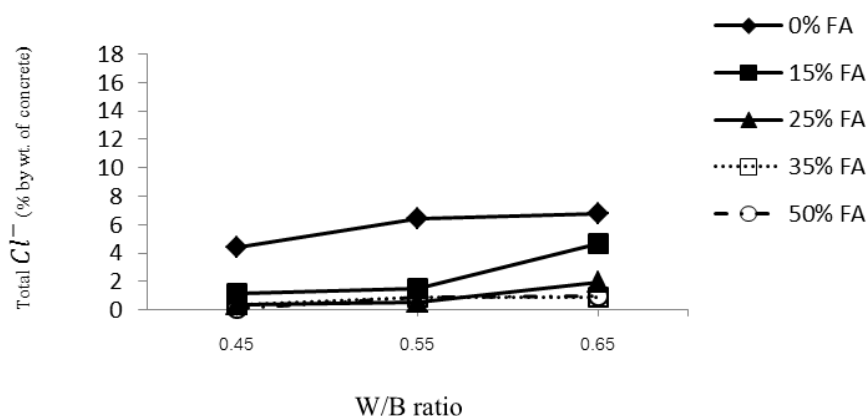
(ข) ความลึก 65 มม.



(ข) ความลึก 75 มม.



(ค) ความลึก 85 มม.



(ญ) ความลึก 95 มม.

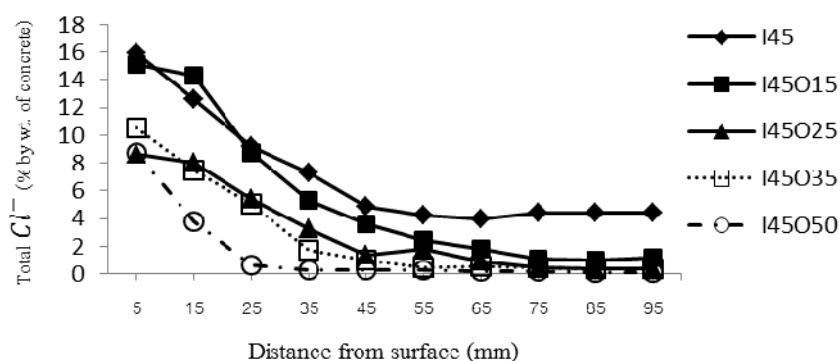
รูปที่ 4.9 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเล 15 ปี

#### 4.8.2 ผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด

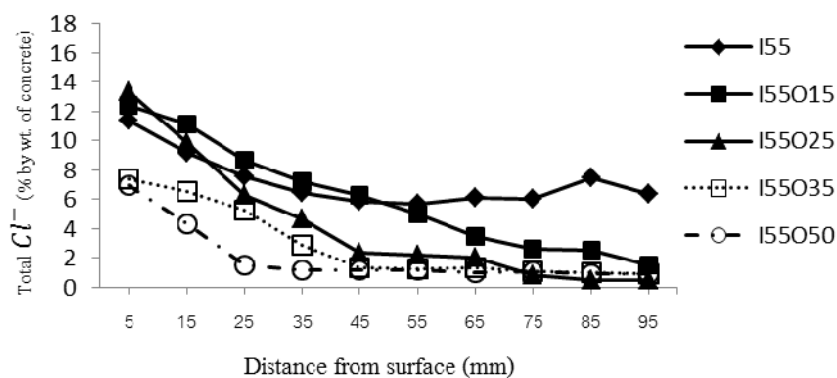
รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีต ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 0.55 และ 0.65 ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่า การผสมเถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน ดังรูปที่ 4.10 เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึก 55 มม.ขึ้นไป ของทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน พบว่า คอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน มีอัตราการลดลงของการแทรกซึมคลอไรด์น้อยมาก ซึ่งต่างจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ยังคงมีอัตราการลดลงของการแทรกซึมคลอไรด์อย่างต่อเนื่อง เช่น จาก รูปที่ 4.10 (ก) คอนกรีต I45 ที่ระดับความลึก 45 55 65 75 85 และ 95 มม. มีปริมาณคลอไรด์ เท่ากับร้อยละ 4.84 4.28 4.02 4.44 4.45 และ 4.45 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ และคอนกรีต I45O15 ที่ระดับความลึก 45 55 65 75 85 และ 95 มม. มีปริมาณคลอไรด์ เท่ากับร้อยละ 3.59 2.44 1.80 1.11 1.03 และ 1.16 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน ส่งผลให้อัตราการลดลงของปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์ต่อระดับความลึกที่เพิ่มขึ้นจากผิวคอนกรีตในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเป็นไปอย่างต่อเนื่อง

เมื่อพิจารณาในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและทุกระดับความลึก พบว่า การแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์ลดลงอย่างชัดเจน เช่น ที่ระดับความลึก 55 มม. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55 จากรูปที่ 4.6 (ข) พบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีปริมาณคลอ

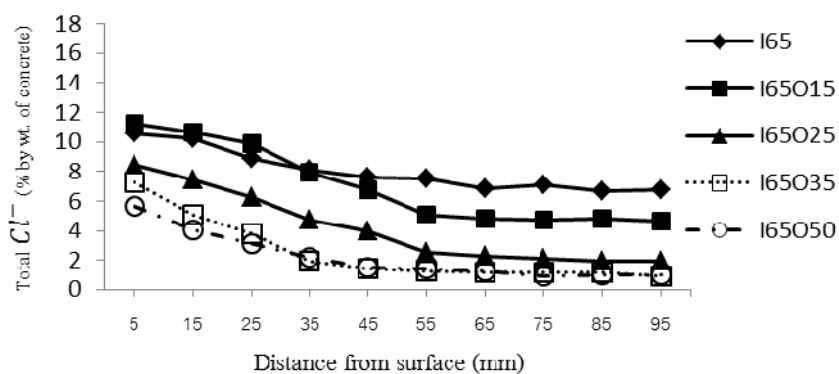
ไรต์ เท่ากับ ร้อยละ 5.74 4.99 2.21 1.28 และ 1.20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ และทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่ระดับความลึกต่างๆ มีแนวโน้มการลดลงของปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน นั้นแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีต ให้ผลดีต่อคุณสมบัติทางด้านความคงทนและลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ โดยการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินจะส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจากเถ้าถ่านหินจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งได้แก่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจะช่วยลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น (และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น (Neville, 1996 ; Bai et al., 2003 ; วิเชียร และ ชีรพงศ์, 2556) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมาของ วิเชียร ชาลี และคณะ (2007)



(ก) W/B = 0.45

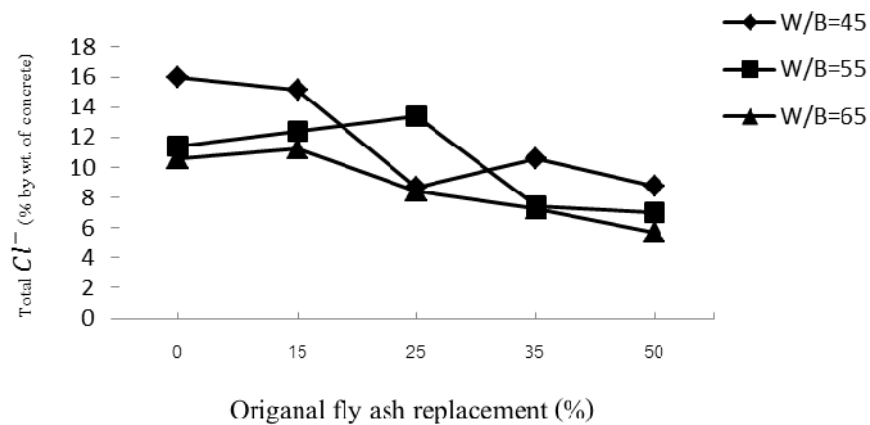


(ข) W/B = 0.55

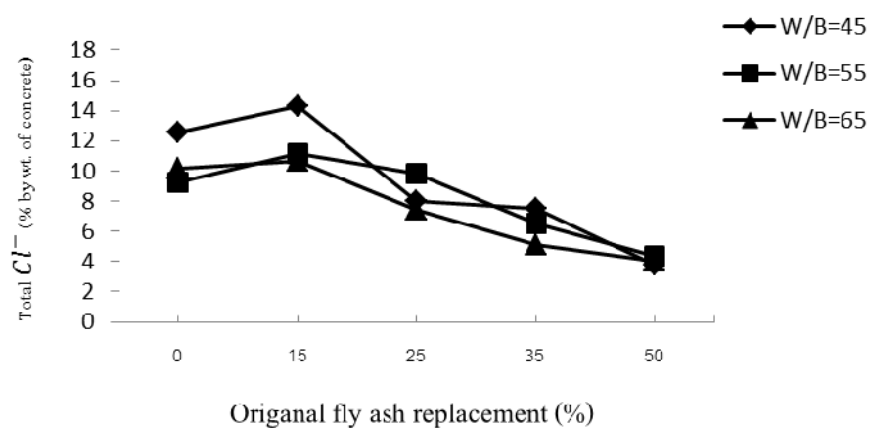


(ค) W/B = 0.65

รูปที่ 4.10 ผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลัง  
 แฉ่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี

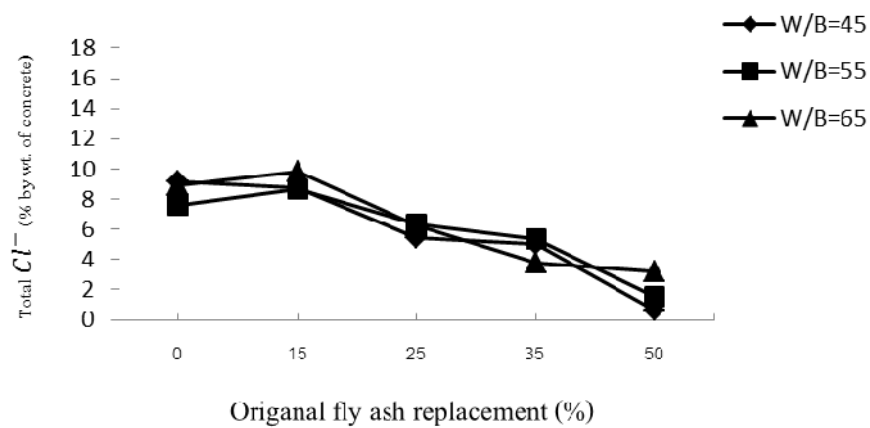


(ก) ความลึก 5 มม.

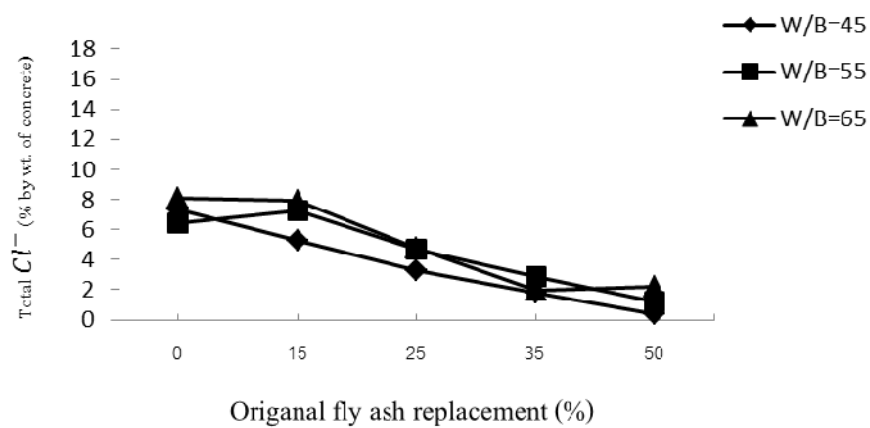


(ข) ความลึก 15 มม.

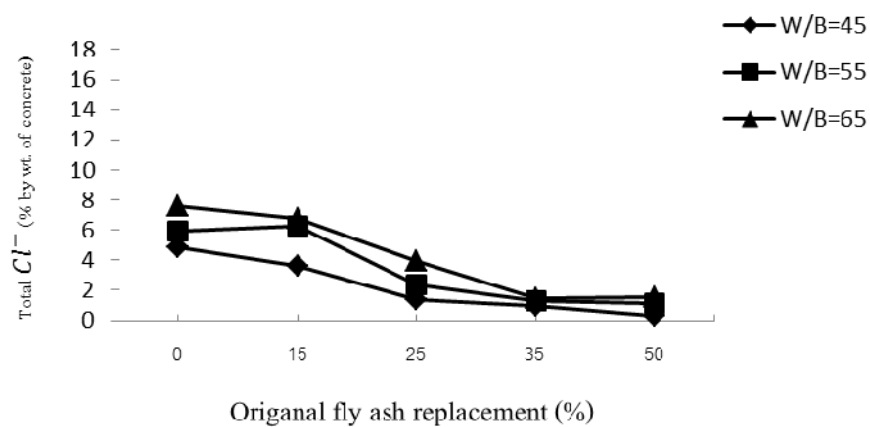




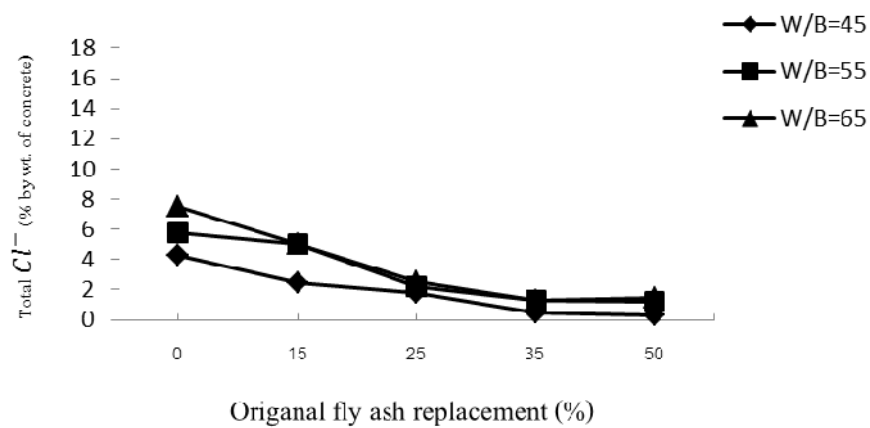
(ค) ความลึก 25 มม.



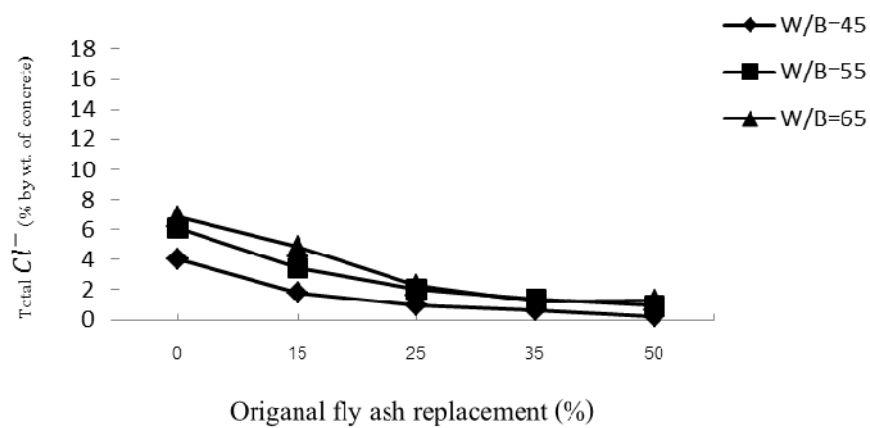
(ง) ความลึก 35 มม.



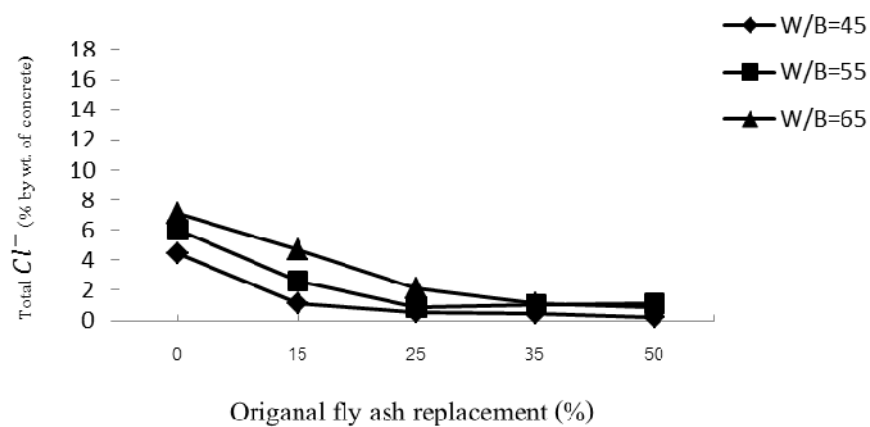
(จ) ความลึก 45 มม.



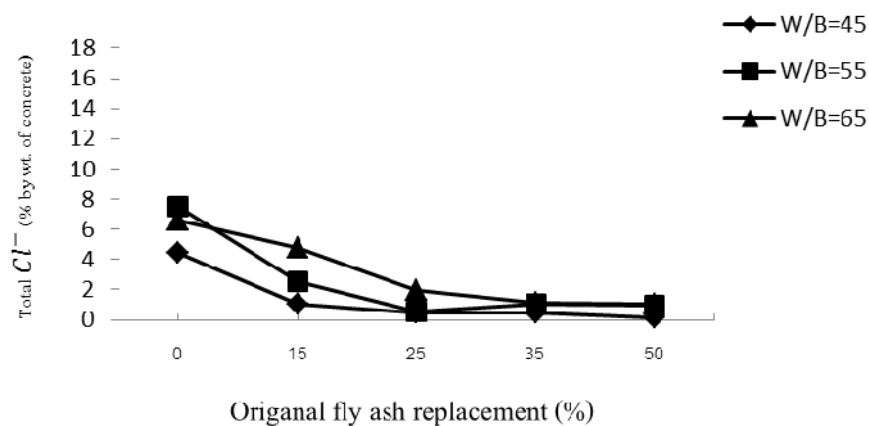
(ฉ) ความลึก 55 มม.



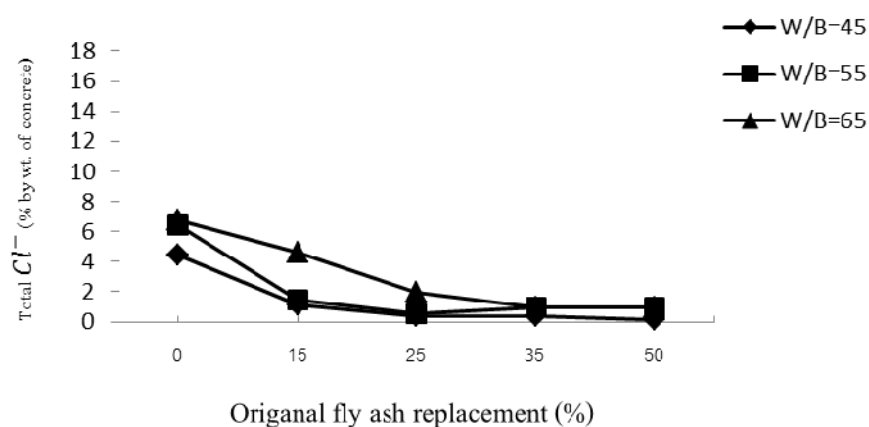
(ช) ความลึก 65 มม.



(ซ) ความลึก 75 มม.



(ก) ความลึก 85 มม.



(ข) ความลึก 95 มม.

รูปที่ 4.11 ผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมคลอไรด์ที่ความลึกต่างๆในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน หลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี

#### 4.9 ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี

##### 4.9.1 การหาความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต

โดยทั่วไป การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตคำนวณได้จากปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตลบด้วยปริมาณคลอไรด์อิสระ ในการศึกษาครั้งนี้จะวิเคราะห์ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ในรูปของร้อยละน้ำหนักของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเทียบกับน้ำหนักของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ดังตารางที่ 4.6

ตัวอย่างการคำนวณความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต I45 ดังนี้

1) หาปริมาณการกักเก็บคลอไรด์ (ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดลบด้วยปริมาณคลอไรด์อิสระ) ในแต่ละความลึก เช่น ตัวอย่างคอนกรีต I45 ที่ระยะความลึก 5 15 25 35 45 55 65 75 85 และ 95 มม. มีปริมาณการกักเก็บคลอไรด์ เท่ากับร้อยละ 1.74 0.36 0.72 0.75 0.23 0.28 0.07 0.38 0.43 และ 0.43 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

2) หาค่าเฉลี่ยของปริมาณการกักเก็บและค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด เช่น ตัวอย่างคอนกรีต I45 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณการกักเก็บ เท่ากับร้อยละ 0.54 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด เท่ากับร้อยละ 7.15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

3) หาค่าความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ โดยนำค่าเฉลี่ยของปริมาณการกักเก็บหารด้วยค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด เช่น ตัวอย่างคอนกรีต I45 มีความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ เท่ากับร้อยละ  $(0.54/7.15) \times 100 = 7.54$  โดยน้ำหนักของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

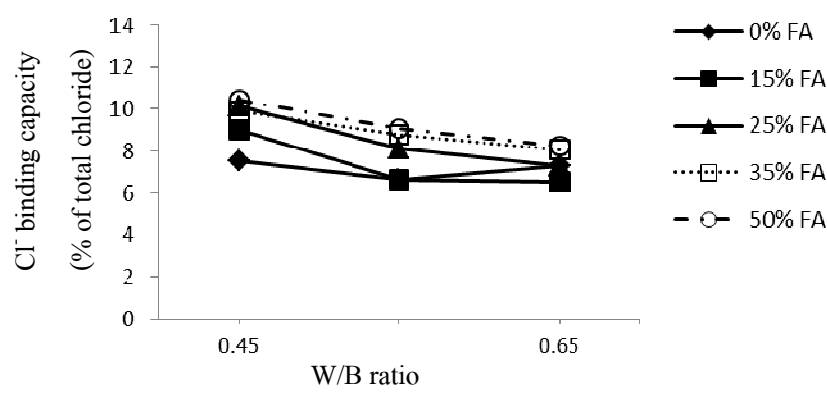
ตารางที่ 4.6 ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเล เป็นระยะเวลา 15 ปี

ส่วนผสม	ค่าเฉลี่ยการกักเก็บคลอไรด์ (ร้อยละ โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)	ค่าเฉลี่ยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ร้อยละ โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)	ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ (ร้อยละ โดยน้ำหนักของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด)
I45	0.54	7.15	7.54
I45O15	0.49	5.46	9.04
I45O25	0.31	3.08	10.15
I45O35	0.28	2.82	9.89
I45O50	0.15	1.47	10.45
I55	0.48	7.24	6.62
I55O15	0.40	6.08	6.56
I55O25	0.35	4.27	8.10
I55O35	0.26	2.92	8.80
I55O50	0.18	2.04	9.08
I65	0.58	8.01	7.28
I65O15	0.48	7.04	6.88
I65O25	0.30	4.16	7.31
I65O35	0.20	2.52	8.07
I65O50	0.18	2.23	8.22

#### 4.9.2 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์

รูปที่ 4.12 แสดงผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตลดลงอย่างชัดเจน

เมื่อพิจารณา การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก วัสดุประสาน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45 0.55 และ 0.65 พบว่า มีความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ เท่ากับร้อยละ 10.15 8.10 และ 7.31 โดยน้ำหนักของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาในทุกอัตราการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน จะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน มีแนวโน้มต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ มีความหนาแน่นมากกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ส่งผลให้ปริมาณ  $C_3A$  ที่เป็นตัวดักจับคลอไรด์ไอออนในรูปปฏิกิริยาเคมี ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีค่ามากกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ทำให้ความสามารถในการดักจับคลอไรด์ไอออนในรูปของปฏิกิริยาเคมีในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำสูงกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง นอกจากนี้ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ จะมีผลของแข็งที่เป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชันมากขึ้น สังเกตได้จากกำลังอัดมีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงจึงเป็นผลให้มีการดักจับคลอไรด์ทางกายภาพ โดยคลอไรด์ถูกดักจับที่ผิวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ได้มากขึ้นด้วย

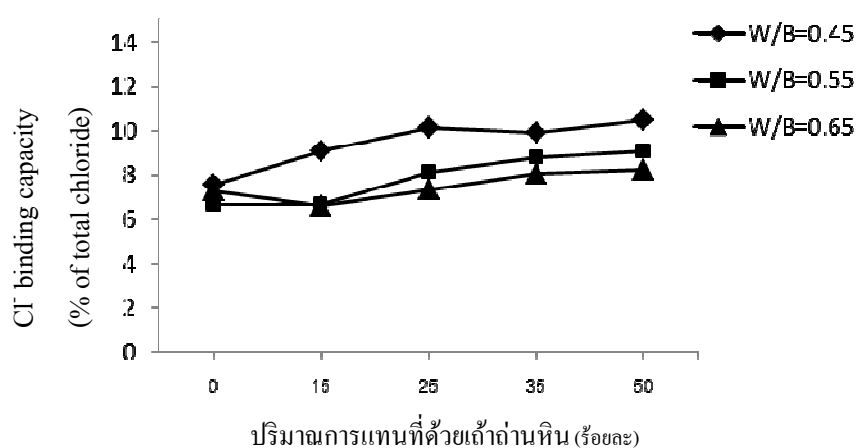


รูปที่ 4.12 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี

#### 4.9.3 ผลของเถ้าถ่านหินต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์

เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี พบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์สูงขึ้น

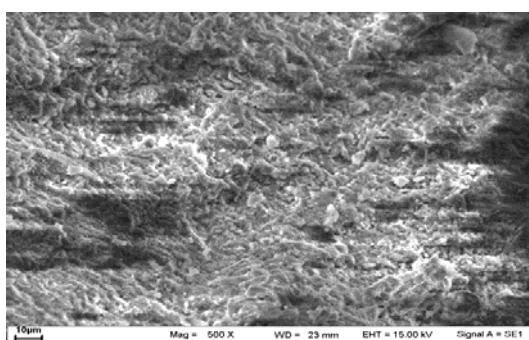
จากรูปที่ 4.13 คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55 แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่าความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ ร้อยละ 0.62 0.62 8.10 8.80 และ 9.08 โดยน้ำหนักของคลอไรด์ทั้งหมด ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน พบว่า การแทนที่เถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์สูงขึ้น เนื่องจาก เถ้าถ่านหินมีปริมาณของสารประกอบอะลูมิเนียมมาก (ร้อยละ 23.7) ซึ่งมากกว่าในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 จึงส่งผลให้ ความสามารถในการดักจับคลอไรด์ในรูปของปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้น เมื่อมีการเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินมากขึ้น และที่ผิวของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และ แคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (C-A-H) ยังสามารถดักจับคลอไรด์ไอออนได้ ซึ่งเป็นการดักจับคลอไรด์ไอออนด้วยกระบวนการทางกายภาพ กล่าวคือ เมื่อมีการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต และ แคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต มากขึ้น การดักจับคลอไรด์ไอออนด้วยกระบวนการทางกายภาพก็มากขึ้น และความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นด้วย (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543 ; Cheewaket et al., 2012)



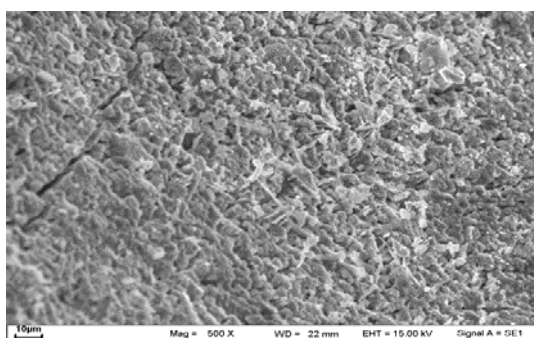
รูปที่ 4.13 ผลของเถ้าถ่านหินต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี

#### 4.10 โครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี

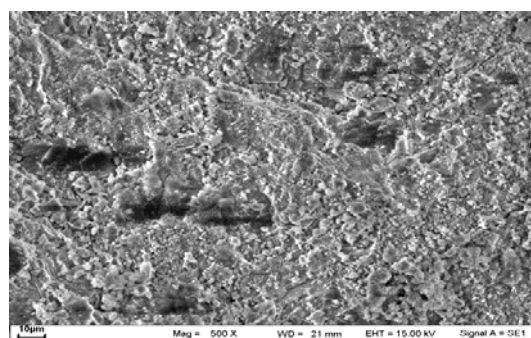
รูปที่ 4.14 แสดงภาพขยาย SEM ของคอนกรีตที่มี W/B=0.45 เมื่อผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งสอดคล้องกับการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมในเหล็กเสริมตามที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งพบว่า เมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินมากขึ้น ผลึกมีลักษณะแน่นขึ้น ซึ่งจะเป็นเจล C-S-H ที่ให้ความแข็งแรงและความทึบน้ำกับคอนกรีต โดยผลึกของ C-S-H ที่เกิดขึ้นในคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมออกไซด์กับซิลิกาหรืออลูมินาจากเถ้าถ่านหิน



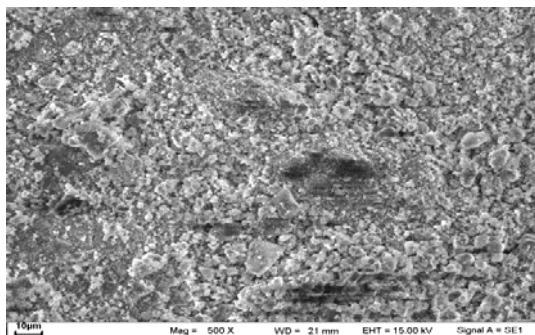
(ก) คอนกรีตธรรมดา



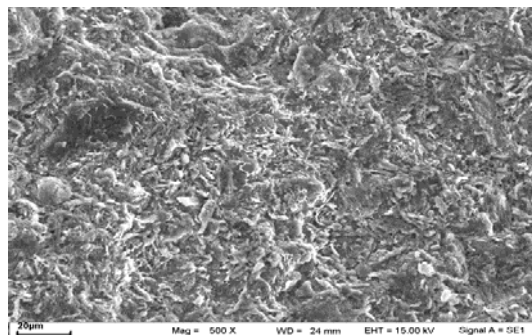
(ข) คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15



(ค) คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 25



(ง) คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 35



(จ) คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50

รูปที่ 4.14 ภาพขยาย SEM ของคอนกรีตที่มี W/B= 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากผลการศึกษาสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

- 5.1.1) การใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปีลดลง
- 5.1.2) การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้านหินในปริมาณที่มากขึ้นในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ ( $W/B=0.45$ ) ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี มีแนวโน้มสูงขึ้น
- 5.1.3) การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้านหินในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งหลักที่ฝังในคอนกรีต ลดลงอย่างชัดเจนและมีแนวโน้มเหมือนกันทั้ง 3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
- 5.1.4) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ส่งผลต่อการลดปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งหลักเสริมในคอนกรีตธรรมดาว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน
- 5.1.5) หลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี พบการเกิดสนิมเหล็กที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 95 มม. น้อยมาก โดยการแทนที่เถ้านหินในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง และเห็นผลในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ( $W/B=0.65$ ) เท่านั้น
- 5.1.6) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ ส่งผลให้ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน หลังแช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี สูงขึ้น
- 5.1.7) การแทนที่ด้วยเถ้านหินในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปีสูงขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ควรเก็บข้อมูลในระยะที่ยาวนานมากขึ้นเพื่อจะได้ข้อมูลที่ชัดเจน และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานจริงได้ดีและน่าเชื่อถือมากขึ้น
- 5.2.1 ควรใช้วัสดุเหลือใช้ชนิดอื่นๆ ที่มีในประเทศ เช่น ถ้ำกลบ ถ้ำกลบเปลือกไม้ ถ้ำปล้ำน้ำมัน มาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล

## เอกสารอ้างอิง

- กิริติกร เจริญพร้อม และ วิเชียร ชาลี. (2554). ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ใน  
 สิ่งแวดล้อมทะเล. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 21(3), หน้า 522-531.
- คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สมาคม  
 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2543). ความคงทนของคอนกรีต,  
 พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัท จุดทอง จำกัด, กรุงเทพมหานคร, หน้า 24-72.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต. ครั้งที่  
 3, สมาคมคอนกรีตไทย
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2547). ถ้ำลอยในงานคอนกรีต, ครั้งที่ 1, สมาคมคอนกรีตไทย
- วิเชียร ชาลี และ ชีรพงศ์ เชื้อพลบ. (2556). การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสม  
 แก้วถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก. *วารสารวิจัยและพัฒนา  
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, 36(2), หน้า 197-213.
- วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2554). ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมแก้ว  
 ถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล. *วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
 พระจอมเกล้าธนบุรี* 34 (3), 203-213
- วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2554). การปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อม  
 ทะเลโดยใช้แก้วถ่านหิน. *Burapha Sci. J.* 16 (2), 51-62
- วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2554). ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมแก้วถ่านหิน  
 ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม* 7(1), หน้า 21-28.
- วิเชียร ชาลี ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ธวัชชัย สาสกุล. (2553). ผลของแก้วถ่าน  
 หิน 3 แหล่งต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล. *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 6, จังหวัดเพชรบุรี* หน้า 40-48.
- ACI 211.1-91(1991). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and  
 Mass Concrete.
- ACI 201.2R-01 (2003). Guide to durable concrete.
- ACI 318-89 (2003). Building Code Requirements for Reinforced Concrete.
- ASTM C311. (2008). Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans  
 for Use in Portland-Cement Concrete. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.02.*

- ASTM C114-15. (2008). Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*
- ASTM C33 / C33M-13. (2008). Standard Specification for Concrete Aggregates. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*
- ASTM C1218. (2008). Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.02.*
- ASTM C1152. (2008). Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete, *Annual Books of ASTM Standards V. 04.02.*
- ASTM C618. (1997). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, fly ash, natural pozzolan, pozzolans. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*
- ASTM C150.(1997). Standard Specification for Portland Cement. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*
- Bai, J., Wild, S. and Sabir, B.B. (2003). Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC-PFA-MK binder compositions exposed to synthetic seawater. *Cement and Concrete Research*, 33, (3), 353-362.
- Broomfield, J.P., 1996, Corrosion of Steel in Concrete, England, Taylor & Francis Ltd
- Cao, H.T., Moorehead, D. and Potter, R.J., (1999). Predicting of Service Life of Reinforced Concrete Structures in Marine Environment and AS 3600. *Concrete Institute of Australia 19<sup>th</sup> Biennial Conference Proceedings*, Sydney, May 1999, pp 131-137.
- Chalee, W., Ausapanit, P. & Jaturapitakkul, C., (2010). Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis. *Materials and Design*, 31, 1242-1249.
- Chalee, W. and Jaturapitakkul, C. (2009). Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment". *Materials and Structures*, 42, 505-514.
- Cheewaket, C., Jaturapitakkul, C. & Chalee, W., (2012). Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site. *Construction and Building Materials*, 37, 693-698.

- Cheewaket, C., Jaturapitakkul, C. & Chalee, W. (2010). Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment. *Construction and Building Materials* 24, 1352–1357.
- Chindapasirt, P., Jaturapitakkul, C. & Sinsiri, T., (2005). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 27, 425 - 428.
- Chindapasirt, P. Sirivivatnanon, V., and Cao, H.T., (2000). Specification of concrete quality and concrete cover for durable structures in marine environment. *the Second Asia / Pacific Conference on Durability of Building Systems: Harmonised Standards and Evaluation*, July 10 -12, 2000 in Bandung, Indonesia.
- Glass G. K., Buenfeld, N. R., (1997). The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corros.Sci.* 39, 1001 - 1013.
- Hui Yu, Kuang-Tsan K. Chiang, Lietai Yang, (2012) Threshold chloride level and characteristics of reinforcement corrosion initiation in simulated concrete pore solutions. *Constr. Build. Mater.* 26, 723-729.
- Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Tangchirapat, W. and Saeting, T. (2007). Evaluation of the sulfate resistance of concrete containing palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 21, 1399–1405.
- Kaushik, S. K. and Islam, S., (1995). Suitability Of Sea Water for Mixing Structural Concrete Exposed to a Marine Environment. *Cement and Concrete Composites* 17, pp. 177-185.
- Miletic, S., Ilic, M., Otovic, S., Falic, R. and Ivanov, Y. (1999). Phase composition changes due to ammonium-sulphate attack on portland fly ash cements. *Construction and Building Materials*, 13, 117–127.
- Neville, A.M., (1996). *Properties of Concrete*, 4<sup>th</sup> ed., England, Addison Wesley
- Thomas, M.D.A. and Matthews, J.D. (2004). Performance of PFA Concrete in a Marine Environment – 10-year Results. *Cement and Concrete Composites*, 26, (1), 5-20.

## ภาคผนวก ก

### ผลผลิต (Output)

#### บทความประกอบการประชุมสัมมนาทางวิชาการระดับชาติ

- 1) REAKSMEY SOEURT PONHSAMPATEA LY และ วิเชียร ชาลี. (2558). กำล้างอัดและการกักกรองนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี. การประชุมวิชาการ โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, ชลบุรี หน้า 1-6.



กำลังอัดและการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน  
ที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี  
Compressive strength and steel corrosion of fly ash concrete  
under 15-year in marine environment

REAKSMY SOEURT<sup>1</sup> PONHSAMPATEA LY<sup>2</sup> และ วิเชียร ชาลี<sup>3\*</sup>

<sup>1,2,3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัดและการกัดกร่อนเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสภาวะน้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี โดยใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 แต่อัตราส่วนวัสดุประสานแทนที่เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างคอนกรีตมีขนาดเป็น 200 x 200 x 250 มม.<sup>3</sup> มีการฝังเหล็กที่ตำแหน่งมุมที่ระยะหุ้ม 95 มิลลิเมตร หลังจากการบ่มคอนกรีตเป็นเวลา 28 วัน นำคอนกรีตไปแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล ได้เก็บตัวอย่างคอนกรีตจากน้ำทะเลมาเจาะทดสอบกำลังอัด ปริมาณคลอไรด์ (ที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝัง) และการกัดกร่อนเหล็กหลังอายุแช่น้ำทะเล 15 ปี ผลการศึกษา พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้การสูญเสียกำลังอัด การกัดกร่อนเหล็กเสริมและปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งฝังเหล็ก ในคอนกรีตลดลง การใช้เถ้าถ่านหินในคอนกรีตที่มี W/B เท่ากับ 0.45 ในช่วงร้อยละ 15 ถึง 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถเพิ่มความคงทนให้กับคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เถ้าถ่านหิน, กำลังอัด, การกัดกร่อนเหล็กเสริม, สภาวะแวดล้อมทะเล

### Abstract

In this study, the compressive strength and steel corrosion of fly ash concrete under 15-year exposure in marine environment were investigated. Water to binder ratio of concretes was varied as 0.45, 0.55 and 0.65. The fly ash from Mae Moh power plant were used to replace Portland cement type I at the percentages of 0, 15, 25, 35 and 50 by weight of binder at each W/B ratio. The 200x200x250 mm<sup>3</sup> concrete

specimens were cast and steel bar with 12 mm in diameter and 50 mm in length were embedded at the covering depth 95 mm. Concrete specimen were cured in fresh water for 28 days, then were placed at tidal zone of sea water. The specimen were test for compressive strength, chloride content (at the position of embedded steel bar) and steel corrosion after being exposed to tidal zone of sea water for 15 years. The results showed that the increase of fly ash replacement in concrete clearly reduced the compressive strength loss, steel corrosion and chloride content at the position of embedded steel bar in concrete. This study, concretes with the fly ash replacement of 15 to 35% by weight of binder with a W/B ratio of 0.45 can be efficiently employed to enhance the durability of concrete structures in seawater.

Keywords: fly ash, compressive strength, steel corrosion, marine environment.

### 1. คำนำ

การเลือกคอนกรีตที่ต้องการใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเล จำเป็นต้องใช้คอนกรีตที่มีความคงทนควบคู่การรับแรงเชิงกลที่ดี การศึกษาเกี่ยวกับความคงทนของคอนกรีตในงานวิจัยที่ผ่านมา [1-3] เป็นที่ยอมรับว่า เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานที่สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน ที่ทำให้คอนกรีตมีสมบัติด้านความคงทนที่ดีขึ้น เช่น ป้องกันการทำลายเนื่องจากสารละลายซัลเฟตได้ดี คอนกรีตมีความที่บ่มน้ำสามารถป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปทำลายความเสียหายให้กับเหล็กเสริมได้ ตลอดจนปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในช่วงหลัง ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตมีการพัฒนาต่อเนื่องและลดการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงเป็นต้น Thomas และคณะ (2004) [3] ได้หล่อตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน

โดยใช้เถาถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่น้ำทะเลในประเทศอังกฤษ ซึ่งเป็นเขตอบอุ่นเป็นระยะเวลาถึง 10 ปี พบว่า อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กเสริมมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มเริ่มต้น แต่เมื่อแช่น้ำทะเลนานขึ้นมีผลไม่แตกต่างกัน อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์และการสูญเสียน้ำหนักเหล็กเสริมในคอนกรีตผสมเถาถ่านหินมีค่าน้อยกว่า คอนกรีตธรรมดา และยังลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถาถ่านหินมากขึ้น นอกจากนี้พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหินร้อยละ 30 และ 50 มีค่าลดลงในช่วงระยะเวลาการแช่น้ำทะเล 2 ถึง 10 ปี เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนการศึกษาความคงทนของคอนกรีตในเขตทะเลที่อยู่ในประเทศไทย ซึ่งเป็นเขตร้อนชื้น Chalee และคณะ (2010) [2] ได้เก็บข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหินในน้ำทะเลถึง 10 ปี ซึ่งพบว่า ผลการศึกษามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับข้อมูลด้านความคงทนที่ศึกษาในสิ่งแวดล้อมทะเลที่เป็นเขตอบอุ่น โดยการใช้เถาถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความคงทนเนื่องจากน้ำทะเลมากขึ้น เช่น การแทรกซึมของคลอไรด์ การกัดกร่อนเหล็กเสริมและการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากน้ำทะเลมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามการศึกษานี้จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลที่ยาวนานที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สอดคล้องกับอายุการใช้งานจริงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และเป็นการเพิ่มความมั่นใจในการนำผลการศึกษาไปใช้งานได้อย่างน่าเชื่อถือมากขึ้น ตลอดจนระยะเวลาที่นานขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อผลการทำลายที่แตกต่างจากช่วงอายุต้นๆได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่แช่บริเวณชายฝั่งทะเลซึ่งสัมผัสกับสถานะเป็ยกลสลับแห่งนานถึง 15 ปี โดยมุ่งเน้นไปที่ผลของระดับกำลังอัด (compressive strength grade) และปริมาณการแทนที่เถาถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อ กำลังอัด ปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กเสริมและการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีต

## 2. วิธีการศึกษา

### 2.1 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของเถาถ่านหินและระดับกำลังอัดของคอนกรีตปกติ ต่อ กำลังอัด การกัดกร่อนเหล็กเสริม และปริมาณของคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี โดยวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถาถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 มีอนุภาคที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 [4] สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถาถ่านหินแม่เมาะ มีปริมาณผลรวมของสารประกอบหลัก  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เท่ากับร้อยละ 79.45 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.52 สามารถจัดเป็นเถาถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [4]

ตัวอย่างคอนกรีตที่ศึกษาได้เตรียมเมื่อ 15 ปีที่แล้ว ซึ่งเป็นคอนกรีตที่มีกำลังอัดของคอนกรีตปกติ (คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) ทั้งหมด 3 ระดับ ตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45 0.55

และ 0.65 ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานได้ใช้เถาถ่านหินจากแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 1 ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด  $200 \times 200 \times 250$  มม<sup>3</sup> และฝังเหล็ก RB 12 ที่ตำแหน่งมุมของก้อนตัวอย่างที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 95 มม. จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเลที่อยู่ในสภาพเป็ยกลสลับแห่งที่มีน้ำขึ้นลงวันละ 2 รอบ สมบัติของน้ำทะเลบริเวณที่นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9-8.2 และปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000-19,000 มก./ล. ส่วนซิลเฟตระหว่าง 2,200-2,700 มก./ล. และมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 20 ถึง 35 องศาเซลเซียส [2]

ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีต

Mix	Mixture Proportion of Concrete (kg/m <sup>3</sup> )					W/B
	Cement Type I	Fly Ash	Fine Agg.	Coarse Agg.	Water	
I45	478	-	639	1,024	215	0.45
I55	478	-	639	971	262	0.55
I65	478	-	639	922	311	0.65
I45FA15	406	72	639	1,004	215	0.45
I45FA25	359	119	639	990	215	0.45
I45FA35	311	167	639	977	215	0.45
I45FA50	239	239	639	957	215	0.45
I55FA15	406	72	639	948	262	0.55
I55FA25	359	119	639	933	262	0.55
I55FA35	311	167	639	918	262	0.55
I55FA50	239	239	639	897	262	0.55
I65FA15	406	72	639	898	311	0.65
I65FA25	359	119	639	881	311	0.65
I65FA35	311	167	639	864	311	0.65
I65FA50	239	239	639	840	311	0.65

### 2.2 การทดสอบ

หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตครบ 15 ปี ได้นำคอนกรีตมาเจาะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. และยาว 100 มม. แฉกหัวตัวอย่างที่เจาะทั้ง 2 ด้านให้เรียบด้วยกัมมะถัน เพื่อใช้ในการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต นอกจากนั้นได้หุบดูการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 95 มม. โดยการวัดพื้นที่ของการเกิดสนิมเหล็ก และนำตัวอย่างคอนกรีตบริเวณรอบผิวเหล็กที่ฝังมาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์โดยใช้น้ำเป็นตัวทำลายตาม ASTM C1218 [5] ซึ่งเป็นปริมาณคลอไรด์อิสระที่อยู่ในโพรงของคอนกรีต รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างทดสอบแสดงดังรูปที่ 1



ก) การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต





ข) การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการกัดกร่อนเหล็กที่ฝังในคอนกรีต



ค) การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

**รูปที่ 1** การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ (ก) กำลังอัด (ข) การกัดกร่อนเหล็กเสริม และ (ค) ปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งฝังเหล็กในคอนกรีตที่อายุหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี

### 3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

#### 3.1 ลักษณะของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล

สภาพตัวอย่างคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 15 ปี ดังรูปที่ 2 โดยสังเกตเห็นว่า ตัวอย่างคอนกรีตมีความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผิวหน้าของคอนกรีต ซึ่งน่าจะเกิดจากการทำลายทางชีวภาพของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในน้ำทะเล เช่น หอย เพรียง และตะไคร่น้ำที่ติดอยู่ตามผิวคอนกรีต ซึ่งความเสียหายดังกล่าวยังไม่รุนแรงเนื่องจากเกิดที่ผิวหน้าคอนกรีตเท่านั้น นอกจากนี้มีร่องรอยความเสียหายที่เกิดจากการสึกกร่อนจากขดสีของหิน กรวด หวาย และการกระแทกของคลื่น โดยสังเกตเห็นขอบและมุมของตัวอย่างคอนกรีตเกิดการแตกเล็กน้อย การทำลายที่ผิวหน้าของตัวอย่างคอนกรีตอาจเกิดจากการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตที่อยู่ในน้ำทะเลด้วย เนื่องจากผิวหน้าคอนกรีตมีลักษณะที่ขรุขระและถูกชะออกมาได้ง่าย อย่างไรก็ตามสภาพผิวหน้าคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินพบว่าไม่มีความแตกต่างกันถึงแม้จะแช่น้ำทะเลนานถึง 15 ปี



**รูปที่ 2** ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 15 ปี

#### 3.2 การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากน้ำทะเล

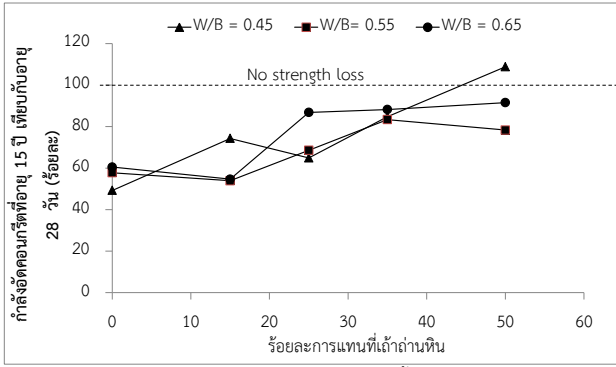
กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 15 ปี แสดงดังตารางที่ 2 พิจารณาการสูญเสียกำลัง

อัดของคอนกรีตเนื่องจากน้ำทะเล ในรูปของร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลที่อายุ 15 ปี เทียบกับกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังรูปที่ 3 พบว่า ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตเกือบทุกส่วนผสมมีค่าร้อยละกำลังอัดที่อายุ 15 ปี เทียบกับอายุ 28 วัน ต่ำกว่า 100 (ยกเว้นคอนกรีต I45FA50) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี คอนกรีตมีการสูญเสียกำลังอัดเมื่อเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (อายุ 28 วัน) โดยการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปีลดลง เช่น คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 และมี W/B เท่ากับ 0.45 มีร้อยละของกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 15 ปี เทียบกับ 28 วัน เท่ากับ 49.2, 74.3, 64.9, 84.8 และ 108.8 ตามลำดับ และมีแนวโน้มเหมือนกันกับคอนกรีตที่มี W/B เท่ากับ 0.55 และ 0.65 นอกจากนั้นยังพบว่า การแทนที่เถ้าถ่านหินถึงร้อยละ 50 ส่งผลทำให้คอนกรีตทั้งสามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี มีร้อยละกำลังอัดเทียบกับ 28 วันสูงสุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เถ้าถ่านหินแม่เมาะมีคุณสมบัติที่ดี และสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ได้สมบูรณ์ส่งผลให้มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นในระยะยาว

การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตในปริมาณที่มากขึ้น ที่มีผลต่อการลดการสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหิน ทำให้ได้ C-S-H ซึ่งทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น [6] นอกจากนั้นจากงานวิจัยที่ผ่านมา [7, 8] พบว่า การใช้วัสดุปอซโซลานผสมในคอนกรีตมีผลให้ลดการทำลายเนื่องจากสารละลายซัลเฟตได้ดี ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตมีการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายซัลเฟตน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในครั้งหนึ่งที่พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น ที่แช่น้ำทะเลที่มีสารละลายซัลเฟตในระดับที่รุนแรง สามารถลดการสูญเสียกำลังอัดลงได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน ถึงแม้จะแช่น้ำทะเลนานถึง 15 ปี

ตารางที่ 2 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 15 ปี

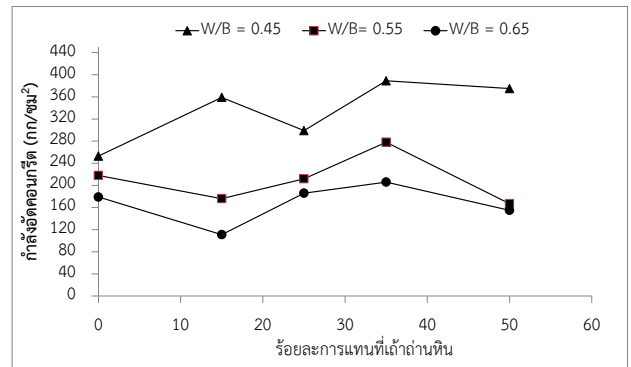
Mix	Compressive Strength (ksc)		
	28 days	15 years	15 years/28 days (%)
I45	514	253	49.2
I45FA15	483	359	74.3
I45FA25	461	299	64.9
I45FA35	459	389	84.8
I45FA50	345	375	108.8
I55	377	218	57.8
I55FA15	326	176	53.9
I55FA25	309	212	68.6
I55FA35	333	278	83.4
I55FA50	213	167	78.4
I65	296	179	60.5
I65FA15	203	111	54.7
I65FA25	214	186	86.9
I65FA35	234	206	88.2
I65FA50	169	155	91.6



รูปที่ 3 ร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลที่อายุ 15 ปี เทียบกับกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

3.3 ผลของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล

เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลาถึง 15 ปี ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า ในคอนกรีตที่มีระดับกำลัง (strength grade) สูงสุด (W/B=0.45) เมื่อใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลมีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วนคอนกรีตที่มีระดับของกำลังต่ำลงมา (W/B= 0.55, 0.65) พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตในปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานกลับทำให้กำลังอัดคอนกรีตมีแนวโน้มลดต่ำลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าถ่านหินปริมาณมาก (high volume fly ash) ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากกว่า 0.55 ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการป้องกันการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลเนื่องจากมีค่ากำลังอัดที่ต่ำ การที่เถ้าถ่านหินไม่สามารถปรับปรุงให้คอนกรีตที่มี W/B สูง จากการทำลายเชิงกลของน้ำทะเลได้ เป็นผลจากคอนกรีตที่มี W/B สูงมีความพรุนที่ค่อนข้างสูงอยู่แล้วจึงส่งผลให้สารละลายซัลเฟตสามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตและถูกทำลายได้ง่ายขึ้น แม้ว่าผสมเถ้าถ่านหินในคอนกรีตก็ไม่สามารถต้านทานการทำลายดังกล่าวได้อย่างเต็มที่ นอกจากนั้นในคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำ จะได้รับผลกระทบจากการทำลายทางกายภาพ (คลื่นกระแทก, การขีดสีกรวดทราย) ค่อนข้างชัดเจน ซึ่งเป็นผลให้เกิดการแตกร้าว เกิดความพรุนที่เกื้อหนุนให้เกิดการทำลายมากขึ้น ส่วนการใช้เถ้าถ่านหินในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ ซึ่งคอนกรีตมีความทึบน้ำและกำลังอัดสูงอยู่แล้ว จะทำให้เถ้าถ่านหินเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างสมบูรณ์และมีกำลังอัดที่สูงขึ้นได้ ประกอบกับคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงจะมีปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สูงตามไปด้วย จึงสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาในเถ้าถ่านหินได้สมบูรณ์มากขึ้น อย่างไรก็ตามภาพรวมแล้วพบว่า กำลังอัดคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าถ่านหินที่มากขึ้นไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และคอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 35 มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 15 ปี สูงที่สุดของกลุ่มที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน ซึ่งอาจเป็นส่วนผสมของเถ้าถ่านหินในคอนกรีตที่เหมาะสมที่มีผลให้สมบัติเชิงกลที่ดีในการต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล โดยคอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 35 และมี W/B=0.45, 0.55 และ 0.65 มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 15 ปี เท่ากับ 389, 278 และ 206 กก./ซม.<sup>2</sup> ตามลำดับ



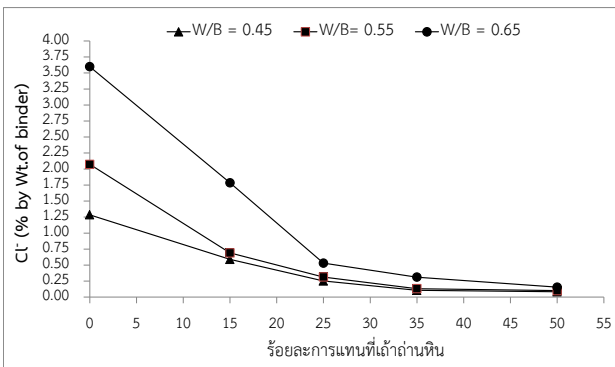
รูปที่ 4 ผลของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 15 ปี

3.4 ปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

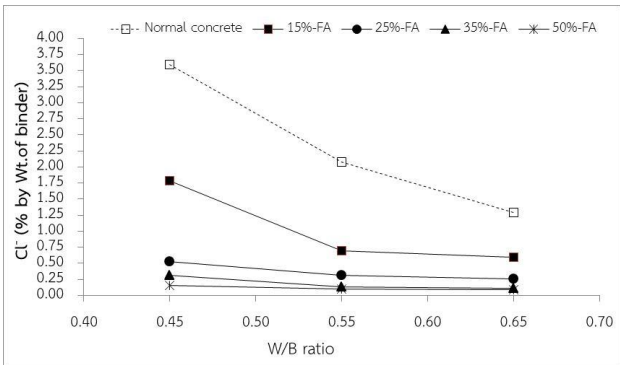
เมื่อพิจารณาปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ซึ่งเป็นคลอไรด์อิสระที่มีผลต่อการเร่งการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้มเหล็ก 95 มม. ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า การแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระลดลงอย่างชัดเจน โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ที่ร้อยละแทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีปริมาณคลอไรด์อิสระเท่ากับร้อยละ 1.29, 0.59, 0.25, 0.11 และ 0.08 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินให้ผลชัดเจนที่ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้อย่างมาก ซึ่งผลดังกล่าวยังเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการศึกษาในสภาพแวดล้อมทะเลจริง ในงานวิจัยที่ผ่านมา [1] การลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเปลี่ยนต่างในคอนกรีตให้เป็นของแข็งที่มีความแข็งแรง และทำให้คอนกรีตที่บ่มน้ำลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้มากขึ้น [6] โดยเห็นผลชัดเจนในระยะเวลาที่ยาวนานซึ่งสอดคล้องกับอายุคอนกรีตที่ทำการศึกษาในครั้งนี้อย่างยาวนานถึง 15 ปี นอกจากนั้น ผลของการอุดช่องว่างของอนุภาคเถ้าถ่านหินที่ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งเถ้าถ่านหินมีเนื้อผิวอนุภาคที่กลมตันจึงส่งผลให้การอุดช่องว่างได้ดี และคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเหมาะสมถึงร้อยละ 50 จึงให้ผลในการต้านทานคลอไรด์ที่มากขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตผลตามรูปที่ 6 พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง มีผลต่อการลดปริมาณคลอไรด์อิสระโดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟ เช่น เมื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจาก 0.65 ลงเป็น 0.45 ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตธรรมดาตกลงเท่ากับร้อยละ 2.31 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ลดลงจากร้อยละ 3.60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่มี W/B=0.65 เป็นร้อยละ 1.29 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่มี W/B=0.45) ขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินสูงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบปริมาณคลอไรด์ลดลงเท่ากับร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ลดลงจากร้อยละ 1.60 โดยน้ำหนักวัสดุ

ประสาน ในคอนกรีตที่มี W/B=0.65 เป็นร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่มี W/B=0.45) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีต โดยคอนกรีตที่มีปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานลดลงสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้นอย่างชัดเจน ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่พบว่า การลดปริมาณน้ำลงไม่ได้ส่งผลให้การต้านทานคลอไรด์ดีขึ้นมากนัก เมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา อาจเป็นผลมาจากความที่น้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่ได้ขึ้นกับปริมาณน้ำในคอนกรีตเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับผลของการอัดแน่นของอนุภาคเถ้าถ่านหินด้วย ซึ่งจะขึ้นกับรูปร่างของเถ้าถ่านหิน โดยอนุภาคที่กลมตันของเถ้าถ่านหินเม็ดเกาะถือได้ว่าเป็นจุดเด่นในการอุดช่องว่างในคอนกรีต และลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 5 ผลของเถ้าถ่านหินต่อปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต หลังแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 15 ปี

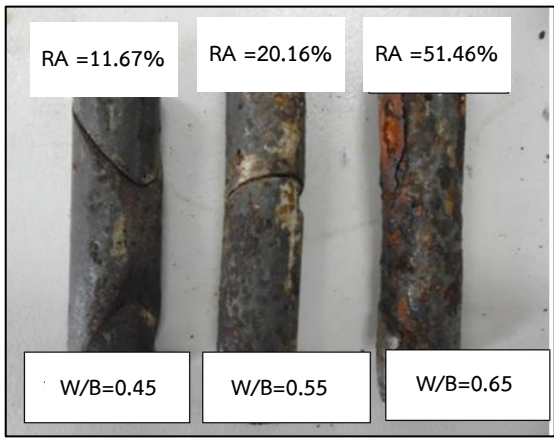


รูปที่ 6 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 15 ปี

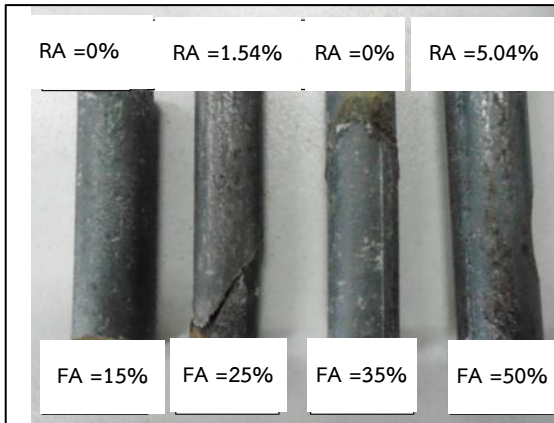
3.5 การกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต

รูปที่ 7 แสดงการกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้ม 95 มม. หลังจากแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นระยะเวลา 15 ปี ซึ่งพบการเกิดสนิมเหล็กในทุกส่วนผสมน้อยมาก โดยเฉพาะในคอนกรีตที่มีระดับของกำลังอัดสูง (W/B=0.45) แทบจะไม่เห็นความแตกต่างระหว่างกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่ต่างกัน (รูปที่ 7ข) เมื่อพิจารณาการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตธรรมดาจากรูปที่ 7(ก) เห็นได้ชัดว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณการเกิดสนิมมากขึ้นอย่างชัดเจน โดยคอนกรีตธรรมดาที่มี W/B เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 มีค่าร้อยละการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีต เท่ากับ 11.67, 20.16 และ 51.46

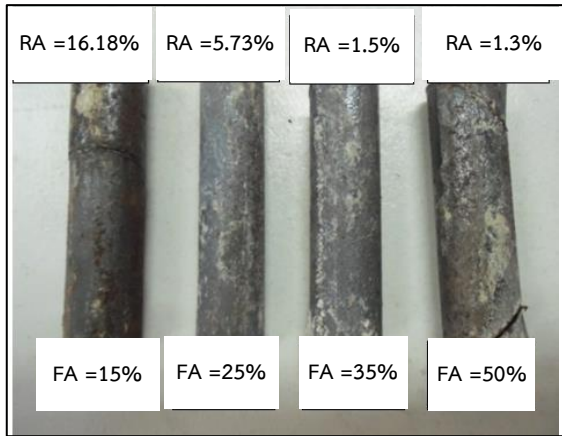
ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับปริมาณคลอไรด์อิสระตามที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินส่งผลให้การเกิดสนิมในเหล็กลดลงต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน และการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้การเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง โดยเห็นผลในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง (W/B=0.65) ดังรูปที่ 7(ค) เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงถึง 0.65 ที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15, 25, 35, และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีร้อยละของพื้นที่การเกิดสนิมเหล็กเท่ากับ 16.18, 5.73, 1.50, และ 1.30 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้น สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ที่จะส่งผลทำให้เกิดสนิมในเหล็กลดลงได้ เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าว ช่วยลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตที่ได้มาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำได้ และเปลี่ยนให้เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน ตลอดจนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ยังเป็นสารตั้งต้นที่ก่อให้เกิดการทำลายเนื่องมาจากซัลเฟตในน้ำทะเล โดยทำให้เกิดยิปซัมที่ละลายน้ำได้ และส่งผลให้คอนกรีตเกิดความพรุนมากขึ้น ดังนั้นปฏิกิริยาปอซโซลานจึงมีส่วนช่วยอย่างมาก ในการทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่น และลดการซึมผ่านของสารเคมีที่จะเข้าไปทำอันตรายกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลได้ [6-8]



ก) คอนกรีตธรรมดา



ข) คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มี W/B=0.45



ค) คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มี W/B=0.65

รูปที่ 7 การกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้ม 95 มม. หลังจากแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นระยะเวลา 15 ปี

#### 4. สรุปผล

- 1) การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปีลดลง
- 2) การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ (W/B=0.45) ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี มีแนวโน้มสูงขึ้น
- 3) การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตลดลงอย่างชัดเจน และมีแนวโน้มเหมือนกันทั้ง 3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
- 4) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ส่งผลต่อการลดปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กเสริมในคอนกรีตธรรมดาว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน
- 5) หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี พบการเกิดสนิมเหล็กที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 95 มม. น้อยมาก โดยการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง และเห็นผลในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง (W/B=0.65) เท่านั้น

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทูสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 98/2558

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Chalee and C. Jaturapitakkul “Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment”. *Materials and Structures*, 42, 2009, pp. 505-514.
- [2] W. Chalee, P. Ausapanit and C. Jaturapitakkul “Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis”. *Mater Design*, 3, 2010, pp. 1242-1249.
- [3] MDA. Thomas and JD. Matthews. “Performance of pfa concrete in a marine environment-10-year results”. *Cem Concr Compos*, 26, 2004, pp. 5-20.
- [4] ASTM C618 - 12a. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.02 2012.
- [5] ASTM C1218. Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.02 2008.
- [6] A.M. Neville. *Properties of Concrete*. 4<sup>th</sup> ed., England, Addison Wesley, 1996.
- [7] C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, W. Tangchirapat and T. Saeting “Evaluation of the sulfate resistance of concrete containing palm oil fuel ash”. *Construction and Building Materials*, 21, 2007, pp. 1399–1405.
- [8] S. Miletic, M. Ilic, S. Otovic, R. Falic and Y. Ivanov “Phase composition changes due to ammonium-sulphate attack on portland fly ash cements”. *Construction and Building Materials*, 13, 1999, pp. 117–127.

**ภาคผนวก ข**  
**รายงานการเงิน**

รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย (NRPM 13 หลัก) 2558A10802328 สัญญาเลขที่ 98/2558  
โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ  
พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ...ความคงทนและโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล เป็นเวลา  
15 ปี

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัย (ศ. /รศ. /ผศ. /ดร. /อ.) ...ผศ.ดร.วิเชียร ชาลี...

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ (วัน/ เดือน/ ปี)...1 ตุลาคม 2557 ถึงวันที่ (วัน/ เดือน/ ปี) ...30 กันยายน 2558

ระยะเวลาดำเนินการ จำนวน ..1....ปี...- .เดือน

รายรับ

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50%) จำนวน ...330,500 .....บาท เมื่อ ...พฤศจิกายน พ.ศ. 2557...

งวดที่ 2 (40%) จำนวน ...264,400.....บาท เมื่อ ...พฤษภาคม พ.ศ. 2558.....

งวดที่ 3 (10%) จำนวน ...-.....บาท เมื่อ ...-.....

รวม ...594,900.....บาท

รายจ่าย

หมวด	งบประมาณที่ตั้งไว้ (บาท)	งบประมาณที่ใช้ จริง (บาท)	จำนวนเงิน คงเหลือ/เกิน (บาท)
1. ค่าตอบแทน	0	0	0
2. ค่าจ้าง	90,000	90,000	0
3. ค่าวัสดุ	111,000	111,000	0
4. ค่าใช้สอย	393,900	393,900	0
5. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ค่าเงินทุนอุดหนุนการวิจัยของ มหาวิทยาลัยเป็นค่าสาธารณูปโภค 10%	66,100	66,100	0
<b>รวม</b>	<b>661,000</b>	<b>661,000</b>	<b>0</b>

(ผศ.ดร.วิเชียร ชาลี)

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน