



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

### โครงการวิจัยเรื่อง

การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจาก

ผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

(Evaluation of long term chloride penetration in concrete under marine  
environment by Bulk diffusion test method)

คณะผู้วิจัย

นายวิเชียร ชาติ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

สนับสนุนโดย ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

กันยายน พ.ศ. 2557

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test” จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 มีงบประมาณทั้งโครงการ 630,000 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ	:	นายวิเชียร ชาลี
หน่วยงาน	:	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ	:	12 เดือน
งบประมาณ	:	630,000 บาท

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล จากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test โดยใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 0.55 และ 0.65 (ส่วนผสมเดียวกับคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี) หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธี Bulk diffusion test ที่อายุ 35 วัน นอกจากนั้น ได้เก็บตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี มาทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ผลการศึกษาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test มีแนวโน้มลดลง และเป็นไปในทิศทางเดียวกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี นอกจากนั้น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาที่มีค่าลดลงมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน การศึกษาครั้งนี้ สามารถประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลระยะยาว จากผลการทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion ได้

คำสำคัญ : การแทรกซึมคลอไรด์ / สิ่งแวดล้อมทะเล / วิธี Bulk diffusion test / เถ้าถ่านหิน

## Abstract

This research aimed to evaluate the long term chloride penetration of concrete under marine environment from the Bulk diffusion test method. Fly ash concretes were cast by using fly ash from Mea Moh power plant to partially replace Portland cement type I at percentages of 0, 15, 25, 35 and 50 by weight of binder. Water to binder ratios (W/B) were varied at 0.45, 0.55, and 0.65. (the same mix proportions of concrete exposed to marine site for 12 years). The cylindrical specimen with 100-mm in diameter and 200-mm in height were cast for Bulk diffusion test at 35 days of curing. In addition, water soluble chlorides in the concrete were measured after the concrete was exposed to the tidal zone for 12 years. The results show that the chloride penetration of concrete from Bulk diffusion test decrease with the increase of fly ash replacement of Portland cement type I, which is the same trend of chloride diffusion coefficient of 12-year exposure in marine site. In addition, when the W/B ratio of concrete was reduced, the decrease of chloride penetration in normal concrete was higher than that of the fly ash concrete. The results of bulk diffusion test in this study can be used to evaluate the chloride penetration of fly ash concrete under long term exposure in marine environment.

**Keywords:** chloride penetration, marine environment, Bulk diffusion test method, fly ash

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูลเพื่อนำไปใช้แก้ปัญหาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลประเทศไทย ให้เกิดความเสียหายน้อยที่สุด ช่วยเสริมสร้างความรู้ และความเข้าใจ ตลอดจนช่วยส่งเสริมการใช้ถ้ำถ้ำหินให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในงานคอนกรีตที่ต้องการก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล

## สารบัญ

### สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญเนื้อหา	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 คอนกรีตในน้ำทะเล	4
2.2 ผลกระทบจากน้ำทะเลต่อคอนกรีต	4
2.3 กลี้อคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมทะเล	6
2.4 กลไกการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์	6
2.5 การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต	10
2.6 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่สัมผัสสิ่งแวดล้อมทะเล	10
2.7 การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีต	12
2.8 วิธีการวัดคลอไรด์และความต้านทานคลอไรด์	13
2.9 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์	16
2.10 เถ้าถ่านหินและปฏิกิริยาปอซโซลาน	18
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20

<b>บทที่ 3 วิธีการศึกษา</b>	<b>24</b>
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	24
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	24
3.3 วิธีการทดสอบ	26
3.4 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์เมื่อแช่น้ำทะเลครบ 12 ปี	32
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล</b>	<b>33</b>
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ แก้ถ่านหินและมวลรวม	33
4.2 ผลของแก้ถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion	36
4.3 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion	40
4.4 ความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion	44
4.5 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดลองโดยวิธี Bulk diffusion	46
4.6 ผลของแก้ถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion และที่แช่น้ำทะเล 12 ปี	50
4.7 การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตระยะยาวจากผลทดสอบ Bulk diffusion	56
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>60</b>
5.1 สรุปผล	60
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>62</b>
<b>ภาคผนวก ก</b>	<b>64</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ไอออนเพื่อป้องกันการเกิดสนิม	9
2.2 มาตรฐานของคุณภาพคอนกรีตในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ตาม ASTM C 1202	14
3.1 อัตราส่วนผสมคอนกรีต	28
3.2 สัญลักษณ์ของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา	29
4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดวัสดุที่ใช้ศึกษา	35
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา	36
4.3 คุณสมบัติของมวลรวม	36
4.4 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบ โดยวิธี Bulk diffusion เป็นเวลา 35 วัน และ 90 วัน	47



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล	4
2.2 ความเสียหายของคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์	7
2.3 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต	8
2.4 เครื่อง Potentiometer titration	13
2.5 เครื่องทดสอบ Rapid chloride penetration test	15
2.6 การหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 2, 3, 4 และ 5 ปี	18
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	26
3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	28
3.3 การตัดตัวอย่างคอนกรีตเป็นชิ้นๆหนาชั้นละ 10 มม. เพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์	30
3.4 การทดสอบ โดยวิธี Colorimetric technique	31
3.5 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลที่อายุ 12 ปี	32
4.1 ภาพถ่ายขยายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	34
4.2 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ	34
4.3 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test เป็นเวลา 35 วัน	38
4.4 การแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test เป็นเวลา 90 วัน	39
4.5 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test เป็นเวลา 35 วัน	42
4.6 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test เป็นเวลา 90 วัน	43
4.7 ความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test	45
4.8 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test เป็นเวลา 35 วัน	48
4.9 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test เป็นเวลา 90 วัน	49

รูปที่	หน้า
4.10 ผลของเถ้านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ในคอนกรีตที่อายุ 35 วัน กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี	52
4.11 การผลของเถ้านหินผลต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ในคอนกรีตที่อายุ 90 วัน กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี	53
4.12 ผลของเถ้านหินต่อความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Colorimetric technique ในคอนกรีตที่อายุ 35 วัน กับความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี	54
4.13 ผลของเถ้านหินต่อความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Colorimetric technique ในคอนกรีตที่อายุ 90 วัน กับความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี	55
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ที่อายุ 35 และ 90 วัน	58
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี กับความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Colorimetric technique ที่อายุ 35 และ 90 วัน	59

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้งานในสภาพแวดล้อมทะเล มีการกัดกร่อนที่ก่อเกิดความเสียหายกับโครงสร้างได้เร็วกว่าโครงสร้างปกติ โดยการทำลายส่วนใหญ่เกิดจากเกลือคลอไรด์ที่เร่งให้สนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และดันคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าวเสียหาย ตลอดจนการรับแรงเชิงกลของเหล็กเสริมและคอนกรีตลดลงอย่างชัดเจน (Neville, 1996 ; Dimitri Val *et al.*, 2003 ; Chalee *et al.*, 2010 ; Cheewaket *et al.*, 2012) โดยทั่วไป สารประกอบคลอไรด์จะไม่ส่งผลที่เป็นอันตรายกับเนื้อของคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริม ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Kaushik and Islam, 1995) พบว่า การใช้น้ำที่มีเกลือคลอไรด์ผสมในคอนกรีตกลับส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น แต่การใช้งานของคอนกรีตในโครงสร้างทั่วไป จำเป็นต้องมีเหล็กเสริมในคอนกรีตเพื่อใช้รับแรงดึง คอนกรีตที่มีเหล็กเสริมจะส่งผลให้การทำลายเนื่องจากคลอไรด์ต่อโครงสร้างคอนกรีตมีความชัดเจนและรุนแรงมากขึ้น การวัดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีเงื่อนไขของการทดสอบที่แตกต่างกัน ทั้งด้านระยะเวลาที่ใช้ทดสอบ กระบวนการทดสอบ ตลอดจนผลที่ได้จากการทดสอบก็แสดงค่าแตกต่างกัน การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต มักแสดงผลในลักษณะของแนวโน้มในการต้านทานคลอไรด์ โดยเฉพาะในการทดสอบที่ใช้ระยะเวลาสั้น อย่างไรก็ตาม ข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีต จำเป็นต้องทราบอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ที่แสดงค่าจริงจากการแทรกซึมในสภาวะธรรมชาติ ที่ตัวอย่างคอนกรีตสัมผัสอยู่ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์สถานะการกัดกร่อนภายใต้ระยะเวลาที่โครงสร้างมีการใช้งานได้อย่างถูกต้องมากขึ้น แต่ในการทดสอบเพื่อให้ได้ข้อมูลดังกล่าวต้องใช้ระยะเวลาในการศึกษายาวนาน ตลอดจนเสียค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ดังนั้นถ้ามีการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ทำได้ง่ายในระยะเวลาสั้นกับผลการทดสอบที่ต้องใช้ระยะเวลานาน ก็จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาพฤติกรรมด้านความคงทนที่ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาได้

การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต โดยวิธี Bulk diffusion test ตามมาตรฐาน ASTM C1556 เป็นอีกวิธีที่สามารถทำได้ง่ายในห้องปฏิบัติการ ใช้ระยะเวลาในการทดสอบ 35 วัน โดยผลการทดสอบแสดงในรูปของเส้นกราฟการแทรกซึมของคลอไรด์ (chloride penetration profile) และสามารถใช้ในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การ

แทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้ ดังนั้นการศึกษาคั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน โดยวิธี Bulk diffusion test ที่วัดผลการแทรกซึมโดยการไทเทรต (titration test) โดยใช้ น้ำเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM C 1218 เพื่อใช้ผลดังกล่าวในการประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลานานถึง 12 ปี ที่หาจากปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบตาม ASTM C 1218 ซึ่งเป็นการประเมินผลทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่ง จากวิธีการทดสอบที่ทำได้ง่ายและรวดเร็ว เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการใช้งานบริเวณชายฝั่งทะเล ตลอดจนอาจใช้เป็นข้อมูลในการประเมินสถานะการกัดกร่อนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ระหว่างการใช้งาน เพื่อวางแผนซ่อมแซมโครงสร้างดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี จากผลทดสอบระยะสั้น โดยวิธี Bulk diffusion test

1.2.2 เพื่อประเมินความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี จากเส้นกราฟการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการไทเทรต (Titration test) และการฉีดพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (Colorimetric technique) ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบระยะสั้น โดยวิธี Bulk diffusion test

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี จากผลทดสอบระยะสั้น โดยวิธี Bulk diffusion test โดยศึกษาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากการทดลองโดยวิธีโดยวิธี Bulk diffusion test (ASTM C1556) ที่วัดในรูปของ Chloride penetration profile และ Colorimetric technic กับการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี โดยหล่อตัวอย่างคอนกรีตจากส่วนผสมคอนกรีตเดียวกันกับคอนกรีตที่มีข้อมูลด้านความคงทนที่อายุ 12 ปี เพื่อทำการทดสอบหาการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธี Bulk diffusion test (ASTM C1556) ที่วัดในรูปของ Chloride penetration profile และความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธี Colorimetric technique ในห้องปฏิบัติการ และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับค่าจริงที่ได้จากตัวอย่างในสิ่งแวดล้อมทะเลโดยส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้เป็นส่วนผสมเดียวกับที่แช่ในน้ำทะเลเมื่อ 12 ปี ที่แล้ว ซึ่งเป็นคอนกรีต

ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 โดยแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะแทนที่เก้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (15 ส่วนผสม) ในการศึกษาจะเก็บตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม<sup>3</sup> ที่ได้แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี มาทำการเจาะทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยการไทเทรต (Titration test) ที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM C 1218 เพื่อใช้ผลเปรียบเทียบกับทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต โดยวิธี Bulk diffusion test

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับการประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เป็นค่าจริง ตามสภาพแวดล้อมทะเลที่คอนกรีตสัมผัสและแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลานาน จากวิธีการทดสอบที่ทำได้ง่าย และรวดเร็ว ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีที่ง่ายและรวดเร็วกับค่าที่ได้จากการทดสอบที่ให้ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกต้อง สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ต้องการใช้งานบริเวณชายฝั่งทะเล ตลอดจนอาจใช้เป็นข้อมูลในการประเมินสถานะการกัดกร่อนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ระหว่างการใช้งาน เพื่อเป็นประโยชน์ในการวางแผนซ่อมแซมโครงสร้างดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## บทที่ 2

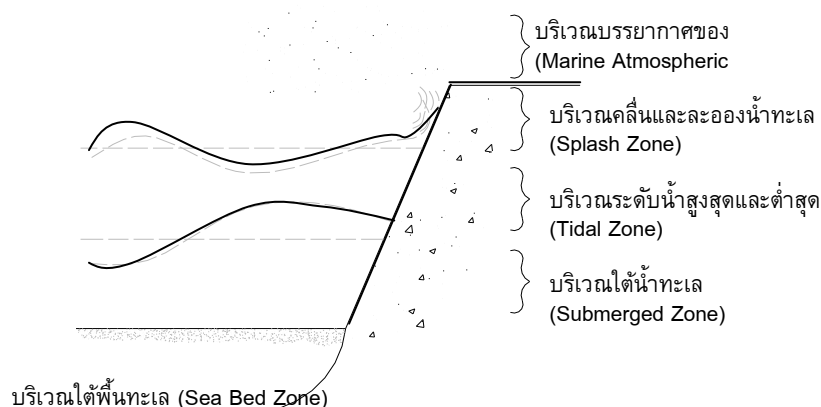
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 คอนกรีตในน้ำทะเล

โครงสร้างของคอนกรีตในน้ำทะเลและบริเวณชายฝั่งเป็นส่วนที่ต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่แปรปรวนส่งผลให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นสูง ไม่ว่าจะเป็นการกัดกร่อนเนื่องจากสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เช่น แรงกระแทกจากคลื่น ทราบ กรวดโดยตรง หรือการกัดกร่อนที่เกิดจากสารประกอบเคมีซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำทะเล การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณจะมีความรุนแรงที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในน้ำทะเลและสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เช่น ความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ตลอดจนสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการกัดกร่อนทางเคมีต่อโครงสร้างคอนกรีต (Broomfield, 1996)

#### 2.2 ผลกระทบจากน้ำทะเลต่อคอนกรีต

ความเสียหายและความรุนแรงของการกัดกร่อนต่อคอนกรีตอาจไม่เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสถานะเปียกสลับแห้งจะมีความเสียหายสูง เพราะบริเวณดังกล่าวมีการขัดสีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตทั้งจากแรงกระแทกของคลื่น ทิศทางลม อุณหภูมิ ความชื้น ระยะเวลาที่โครงสร้างอยู่ในสถานะเปียกสลับแห้ง การไหลเวียนของน้ำทะเล นอกจากนี้ คอนกรีตที่สถานะเปียกสลับแห้งมีการสะสมสารเคมีทั้งซัลเฟต คลอไรด์ และเกลือต่าง ๆ ในช่องว่างของคอนกรีต ทำให้มีความเข้มข้นสูงกว่าปกติ จึงเกิดการกัดกร่อนที่รวดเร็ว ในกรณีที่มีรอยแตกร้าวเล็ก ๆ ซึ่งเกิดจากการหดตัวหรือขยายตัวเนื่องจากความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะยิ่งทำให้คอนกรีตมีความเสียหายรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยทั่วไปลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล สามารถแบ่งได้ 5 บริเวณ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล

### 2.2.1 บริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric Zone)

คอนกรีตบริเวณบรรยากาศของทะเลไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง แต่จะสัมผัสกับละอองน้ำทะเลที่ลมพัดมา อากาศที่มีไอเกลือจากน้ำทะเลเจือปน ความเข้มข้นของเกลือจะลดลงตามระยะห่างจากน้ำทะเล โดยขึ้นอยู่กับสภาพทางธรรมชาติของชายฝั่งทะเล ทิศทาง และความแรงของกระแสลมที่จะพัดพาละอองไอเกลือ แม้โครงสร้างที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลเข้ามาหลายกิโลเมตรก็ยังมีโอกาสได้รับเกลือจากน้ำทะเลได้ ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นผลเนื่องจากเกลือคลอไรด์ที่มีในอากาศเกิดการพัดพาโดยลมสัมผัสกับเนื้อคอนกรีต เกิดการแพร่ของอออนคลอไรด์ (Chloride Ions) เข้าไปในเนื้อคอนกรีตในบริเวณที่มีรอยแตกร้าวหรือมีความพรุน ส่งผลให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมเร็วขึ้นและเกิดการขยายตัวดันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหาย

### 2.2.2 บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone)

บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่เหนือระดับน้ำขึ้นสูงสุด โดยคอนกรีตที่ก่อสร้างบริเวณนี้จะเปียกน้ำเมื่อสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล ซึ่งเมื่ออยู่ในสภาพแห้งในช่วงน้ำลงความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้จะเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์ค่อนข้างรุนแรง เนื่องจากในสภาพที่คอนกรีตเปียกสลับแห้งทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้เร็วขึ้น นอกจากนั้นบริเวณนี้ยังได้รับแรงกระแทกค่อนข้างแรง ส่งผลให้เกิดรอยปริแตกเล็กๆ ทำให้คลอไรด์ ความชื้นและออกซิเจน ซึมผ่านเข้าไปถึงเหล็กได้เร็วขึ้น โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะเป็นผลเนื่องจากคลอไรด์เป็นหลัก ส่วนการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตจะมีน้อยมาก โดยพบว่าความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณนี้จะสูงกว่าบริเวณอื่น

### 2.2.3 บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Zone)

บริเวณที่สัมผัสกับน้ำทะเลในลักษณะเปียกและแห้งสลับกัน จะได้รับผลกระทบทั้งจากคลื่น กระวาดทราย ที่กระแทก ตลอดจนผลกระทบจากการกัดกร่อนเนื่องจากกระบวนการทางเคมีทั้งคลอไรด์และซัลเฟต ซึ่งน้ำทะเลจะเข้าสู่เนื้อคอนกรีตที่แห้งโดยการซึมผ่าน (Absorption) จนคอนกรีตอยู่ในสภาพอึดตัวและเมื่อสภาพแวดล้อมเปลี่ยนเป็นแห้งจะมีคราบเกลือที่ติดผิวคอนกรีต โดยเกลือของสารประกอบต่างๆ เมื่ออยู่ในสถานะของแข็งจะไม่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีต แต่เมื่อกลับมาสภาพเปียกอีกครั้ง จะได้เป็นสารละลายคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นมากขึ้นและแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตมากขึ้น ซึ่งเมื่อน้ำลดคอนกรีตจะสัมผัสกับออกซิเจนและคลอไรด์ที่มีเข้มข้นอยู่แล้วในเนื้อคอนกรีตจะเร่งให้เกิดสนิมเหล็กมากขึ้น ความเสียหายที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมแบบนี้มีความรุนแรงมากขึ้นในกรณีในช่วงเวลาที่คอนกรีตแห้งนาน และนอกจากนั้นบริเวณนี้ยังได้รับผลกระทบจากการกัดกร่อนของซัลเฟต ฟิชและสิ่งมีชีวิต อีกด้วย

### 2.2.4 บริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged Zone)

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะมีความรุนแรงน้อยกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบที่รุนแรงจากคลื่น และการซึมผ่านของออกซิเจนเข้าไปเพื่อเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมมีน้อยมาก ถึงแม้ความเข้มข้น

ของคลอไรด์จะมีสูงก็ตาม ถ้าไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจนก็ไม่เกิดสนิมในเหล็กเสริม การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นผลเนื่องจากซัลเฟตที่เกิดปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์โดยตรง

### 2.2.5 บริเวณใต้พื้นทะเล (Seabed Zone)

เป็นบริเวณใต้พื้นทรายหรือพื้นดินใต้น้ำทะเล ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การเน่าเปื่อยทางชีวภาพ การกัดกร่อนจากพืช และสิ่งมีชีวิตบางชนิด

## 2.3 เกลือคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมทะเล

โดยทั่วไปน้ำทะเลประกอบด้วยสารละลายของเกลือหลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่มีผลต่อความทนทานของคอนกรีต เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แมกนีเซียมคลอไรด์ ( $MgCl_2$ ) แมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) แคลเซียมซัลเฟต ( $CaSO_4$ ) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และโพแทสเซียมซัลเฟต ( $K_2SO_4$ ) ซึ่งความเข้มข้นของเกลือเหล่านี้จะมีค่าไม่เท่ากันในน้ำทะเลแต่ละบริเวณ เนื่องจากความแตกต่างของสภาพแวดล้อมทางภูมิประเทศ และสภาพภูมิอากาศ เช่น บริเวณทะเลเหนือ (North Sea) มีประมาณ 33 กรัมต่อลิตร บริเวณมหาสมุทรแอตแลนติก (Atlantic Ocean) และมหาสมุทรอินเดีย (India Ocean) มีประมาณ 33 กรัมต่อลิตร บริเวณมหาสมุทรเมดิเตอร์เรเนียน (Mediterranean Ocean) มีประมาณ 39 กรัมต่อลิตร และมีสูงถึง 43 กรัมต่อลิตรในอ่าวเปอร์เซีย (Persian Gulf) ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วผลรวมของปริมาณเกลือทั้งหมดมีค่าประมาณ 35 กรัมต่อลิตร (Neville, 1996) โดยทั่วไปไอออนของเกลือแต่ละชนิดในน้ำทะเลค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยเกลือคลอไรด์จะมีประมาณ 20 กรัมต่อลิตร ซัลเฟต 2.8 กรัมต่อลิตร โซเดียม 11.1 กรัมต่อลิตร แมกนีเซียม 1.4 กรัมต่อลิตร แคลเซียม 0.5 กรัมต่อลิตร และโปแตสเซียม 0.4 กรัมต่อลิตร และในบริเวณอ่าวไทยพบว่า มีคลอไรด์ไอออนประมาณ 16-19 กรัมต่อลิตร (Chalee, et al., 2010) ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสารประกอบ โซเดียมคลอไรด์

นอกจากนี้ น้ำทะเลยังมีก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ด้วย ค่า pH ของน้ำทะเลมีค่าอยู่ประมาณ 7.5 ถึง 8.4 การแทรกซึมของน้ำทะเลเข้าไปในคอนกรีตอาจทำให้ค่า pH ของคอนกรีตลดลงบ้าง โดยค่า pH ของคอนกรีตที่ต่ำที่สุดมีค่าประมาณ 12.0

## 2.4 กลไกการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

โดยทั่วไปสารประกอบคลอไรด์จะไม่ส่งผลที่เป็นอันตรายกับเนื้อของคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริม ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้ น้ำที่มีปริมาณของคลอไรด์ผสมในคอนกรีต กลับส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้น แต่การใช้งานของคอนกรีตในโครงสร้างทั่วไปจำเป็นต้องใส่เหล็กเสริมเข้าไปในคอนกรีตเพื่อรับแรงดึง ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตรับแรงดึงได้น้อยมาก และการที่ในคอนกรีตมีเหล็กเสริมนี้เองจึงส่งผลให้การทำลายเนื่องจากคลอไรด์ต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความชัดเจนและรุนแรงมาก ทั้งนี้เนื่องจากการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่



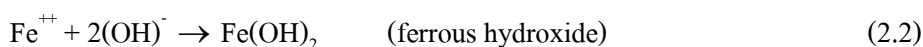
คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมและคอนกรีตบริเวณรอบๆ เหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหายเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริม ทำให้ดันคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าว ตลอดจนความสามารถในการรับแรงของเหล็กเสริมคอนกรีตต่ำลงและเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ลายของค้ำอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดฟิล์มบางๆ ของ  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  เคลือบผิวเหล็กไว้ และฟิล์มนี้ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสนิมเหล็ก อย่างไรก็ตามอ็อกซิเจนของคลอไรด์สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ และเมื่อมีน้ำและก๊าซออกซิเจนตรงบริเวณเหล็กเสริมที่ไม่มีฟิล์มป้องกันอยู่ เหล็กจะเป็นสนิม โดยลักษณะการทำลายของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมจริงแสดงดังรูปที่ 2.2



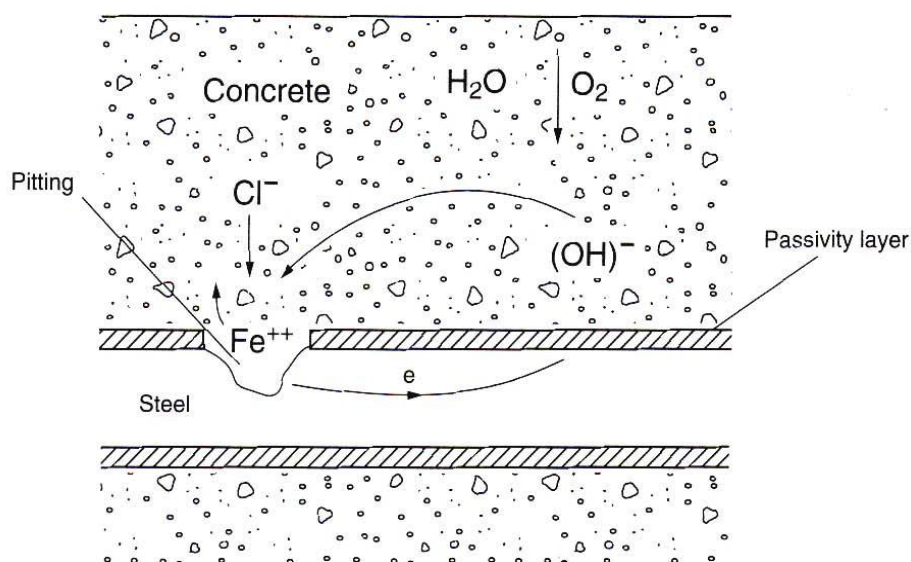
รูปที่ 2.2 ความเสียหายของคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์

การเกิดสนิมในเหล็กเกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของเหล็กเสริมในคอนกรีต ทำให้เกิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีขึ้น มีขั้วบวก (Anode) และขั้วลบ (Cathode) เชื่อมกันโดยน้ำซึ่งมีคลอไรด์ในโพรงของซีเมนต์ ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ประจุไฟฟ้าบวกเฟอร์รัสไอออน  $\text{Fe}^{++}$  ที่ขั้วบวกจะวิ่งไปสู่สื่ออิเล็กโทรไลต์ ขณะที่อิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าลบ  $e^-$  วิ่งตามเหล็กเสริมไปที่ขั้วลบ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะรวมกับน้ำและออกซิเจนทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ซึ่งวิ่งผ่านสื่ออิเล็กโทรไลต์ไปรวมกับ  $\text{Fe}^{++}$  ทำให้เกิด  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  และทำปฏิกิริยาออกซิเดชันจนทำให้เกิดสนิม ดังรูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 2.1 ถึง 2.4 (Broomfield, 1996 ; (Neville, 1996)

Anodic reactions:



Cathodic reaction:



รูปที่ 2.3 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต

เมื่อออกซิเจนถูกใช้จนหมดไป น้ำก็สามารถอุปฏิกิริยาขึ้นมาใหม่ได้ แต่จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการเกิดที่ต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้จึงไม่เกิดการกัดกร่อนในคอนกรีตที่แห้งตลอดเวลา ซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ต่ำกว่าร้อยละ 60 หรือคอนกรีตที่จมอยู่ในน้ำทะเล ซึ่งไม่มีโอกาสได้สัมผัสกับอากาศ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมที่จะเกิดการกัดกร่อน อยู่ในช่วงร้อยละ 70 ถึง 80 ถ้าความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่านี้ จะทำให้ออกซิเจนแพร่เข้าไปในคอนกรีตได้น้อยลง

ความต่างศักย์ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี สามารถเกิดขึ้น เมื่อคอนกรีตมีสภาพที่แตกต่างกัน เช่น ส่วนหนึ่งของคอนกรีตจมในน้ำทะเลตลอดเวลา แต่อีกส่วนหนึ่งต้องสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นระยะๆ ในบางกรณีความต่างของระยะหุ้มคอนกรีตส่งผลถึงการเชื่อมต่อของสื่อไฟฟ้าเคมี มีผลทำให้เกิดความต่างศักย์ รวมไปถึงความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือของน้ำในโพรงคอนกรีตด้วย สำหรับการกัดกร่อนในช่วงต้น ฟิล์มบางจะถูกเจาะ โดยคลอไรด์ไอออนจะกระตุ้นให้ผิวเหล็กเสริมกลายเป็นขี้ขาวก พื้นผิวด้านที่ไม่ถูกกระตุ้นก็จะมีสภาพเป็นขี้ขาว ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6



เนื่องจากคลอไรด์ไอออนเป็นเป็นตัวก่อให้เกิดปฏิกิริยาอีกครั้ง ดังนั้นสนิมเหล็กที่เกิดขึ้นจึงไม่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ แม้ว่าเฟอรัสคลอไรด์จะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเซลล์ไฟฟ้าเคมี มีความจำเป็นต้องใช้น้ำในโพรงของคอนกรีตเป็นตัวกลางเชื่อมระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ ระบบโพรงของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวในคอนกรีตเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกัดกร่อน เนื่องจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยน้ำที่อยู่ในโพรงเป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ทำให้เหล็กเสริมเกิดการขยายตัว ปริมาตรเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดรอยแตก (Cracking) การหลุดร่อน (Spalling) ไปจนถึงคอนกรีตกับเหล็กเสริมไม่มีแรงยึดเหนี่ยวต่อกัน (Delamination) ในขณะที่เกิดการกัดกร่อนพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมที่ทำหน้าที่เป็นขั้วบวกจะมีขนาดเล็กลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดรูขนาดเล็กบนเหล็กเสริม ความต่างศักย์เกิดจากการที่คอนกรีตมีความแตกต่างกัน ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น จากความแตกต่างของความชื้น ความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือของน้ำในโพรง ความแตกต่างของสภาพแวดล้อม และความแตกต่างของความหนาของคอนกรีตหุ้ม เป็นต้น เซลล์ไฟฟ้าในลักษณะนี้ของคอนกรีตเซลล์หนึ่งอาจยาว 10 มม. จนถึง 6 ม. คอนกรีตอาจมีคลอไรด์เนื่องจากการใช้ส่วนผสมของวัสดุที่มีคลอไรด์ เช่น ใช้น้ำ ทราบ หิน, ปูนซีเมนต์ หรือสารเคมีผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ปนอยู่ ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบว่ามีปริมาณคลอไรด์อยู่ในปริมาณที่ไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อคอนกรีต ว.ส.ท. ได้กำหนดปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อป้องกันการเกิดสนิมต้องมีค่าไม่เกินพิคัดตามตารางที่ 2.1 โดยคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตอัดแรงจะกำหนดไว้ก่อนข้างค้ำคือไม่เกินร้อยละ 0.06 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตอัดแรงต้องเหล็กเสริมที่มีกำลังสูง และการทำลายพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมเพียงเล็กน้อยก็ส่งผลกระทบต่อรับแรงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนข้างชัดเจน ดังนั้นจึงยอมให้ปริมาณคลอไรด์ที่เข้าไปสัมผัสก่อนข้างน้อย เพื่อลดความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

**ตารางที่ 2.1** ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ไอออนเพื่อป้องกันการเกิดสนิม (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

ชนิดขององค์อาคาร	ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ไอออน (CI) ที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีต (ร้อยละ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)
คอนกรีตอัดแรง	0.06
คอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับคลอไรด์ในขณะใช้งาน	0.15
คอนกรีตเสริมเหล็กในสถานะแห้งหรือที่มีการป้องกันความชื้นในขณะใช้งาน	1.00
งานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆ	0.30

## 2.5 การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต

กลไกการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตเกิดขึ้นได้หลายลักษณะ ขึ้นกับสิ่งแวดล้อมภายนอกที่คอนกรีตสัมผัส และ โครงภายในเนื้อคอนกรีต ดังรายละเอียดต่อไปนี้

### 2.5.1 การแพร่ (Diffusion)

การแพร่ เป็นลักษณะของการเคลื่อนที่ของคลอไรด์จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยการเคลื่อนที่ของคลอไรด์จะผ่านโพรงคาпилลารี (Capillary pore) ที่อิมตัวด้วยน้ำ ดังนั้นลักษณะของการแพร่จะเกิดกับส่วนของโครงสร้างคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลและเป็นส่วนของคอนกรีตที่อิมตัวด้วยน้ำเป็นหลัก

### 2.5.2 การดูดคลอไรด์เข้าโพรงคาпилลารี (Capillary suction)

การดูดคลอไรด์เข้าโพรงคาпилลารี เกิดขึ้นโดยน้ำเกลือคลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปในส่วนที่แห้งของโพรงคาпилลารี (Capillary pore) ในคอนกรีต ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นบริเวณใกล้ผิวคอนกรีต และเกิดขึ้นในกรณีที่คอนกรีตสัมผัสกับสภาพเปียกและแห้งสลับกัน ทำให้น้ำเกลือคลอไรด์สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในโพรงคาпилลารีในคอนกรีตได้เร็ว และอิมตัวภายในเวลาอันรวดเร็วกลไกการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ในคอนกรีตที่เกิดขึ้นเนื่องจากการดูดคลอไรด์เข้าโพรงคาпилลารี

### 2.5.3 การซึมผ่าน (Permeability)

การซึมผ่านของคลอไรด์ เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันของน้ำ (Hydrostatic pressure) ซึ่งส่งผลให้คลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปในคอนกรีตได้ ส่วนใหญ่เกิดในบริเวณที่คอนกรีตแช่น้ำทะเลภายใต้แรงดันน้ำ

### 2.5.4 การดึงดูดไอออน (Ion adsorption)

โครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในได้น้ำทะเลตลอดเวลา พบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่ใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดไอออนจะเกิดสูงขึ้นเนื่องจากบริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ประจุบวกบริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตจะดึงดูดคลอไรด์ ไอออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่บริเวณนั้น

## 2.6 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่สัมผัสสิ่งแวดล้อมทะเล

ปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์สามารถเกิดขึ้นได้เสมอ เมื่อคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีต โดยเฉพาะในกรณีที่คอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเล คลอไรด์ที่พบมีแหล่งที่มาจากน้ำทะเลนั่นเอง โดยคลอไรด์จะตกค้างบนผิวหน้าคอนกรีตในรูปของไอเกลือของน้ำทะเลที่มีขนาดเล็ก ซึ่งถูกพัดพามากับคลื่นและกระแสนลม หรืออาจอยู่ในรูปของละอองน้ำทะเล ซึ่งทำให้คอนกรีตมีสภาพเปียกชื้นเนื่องจากละอองน้ำทะเลไอของคลอไรด์สามารถพัดพาไปได้ไกลถึง 2 กิโลเมตร แต่การเคลื่อนที่ของไอคลอไรด์

ขึ้นอยู่กับกระแสน้ำและสภาพภูมิประเทศ นอกจากนี้ น้ำใต้ดิน หรือน้ำกร่อย (Brackish groundwater) ที่สัมผัสกับคอนกรีต ก็ล้วนเป็นแหล่งที่มาของคลอไรด์ อย่างไรก็ตามคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีตได้ โดยอาศัยน้ำเป็นตัวนำพา และเมื่อคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง มีผลทำให้บริเวณผิวเหล็กเสริมเกิดการสะสมของคลอไรด์ไอออนในปริมาณที่สูง เมื่อคอนกรีตจมน้ำได้ น้ำทะเลตลอดเวลา ก็ย่อมเกิดการซึมผ่านของคลอไรด์ แต่บริเวณใต้น้ำทะเลมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยและอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตเป็นช่องว่างที่อึดตัวด้วยน้ำ ทำให้ไม่มีออกซิเจนที่จะไปรวมตัวกับน้ำและอิเล็กตรอนที่ขั้วลบ สำหรับคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง ปริมาณคลอไรด์ที่พบในคอนกรีตจะสูงขึ้น ซึ่งพบมากกับโครงสร้างที่ตั้งอยู่ตามชายฝั่ง ในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น เมื่อคอนกรีตเริ่มสัมผัสกับน้ำทะเล คอนกรีตจะดูดซับน้ำทะเลจนกระทั่งคอนกรีตนั้นอึดตัวไปด้วยน้ำ และถ้าหากสภาพภายนอกคอนกรีตเปลี่ยนเป็นสภาพแห้ง ทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำจะเกิดการเคลื่อนที่ย้อนกลับ และระเหยออกจากคอนกรีต ทำให้เกลือเกลือตกค้างในช่องว่าง เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกครั้ง ความเข้มข้นของเกลือบริเวณใกล้ผิวหน้าจะสูงขึ้น โดยเกลือที่มีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะเกิดการถ่ายเทไปยังบริเวณภายในที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า เรียกการถ่ายเทชนิดนี้ว่า การแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและแห้ง ส่งผลให้เกลือยังสามารถแพร่เข้าไปในคอนกรีตและเข้าไปสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น ความสามารถในการแพร่ของเกลือนั้น ขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกคอนกรีตและช่วงระยะเวลาที่คอนกรีตแห้งตัว

โดยทั่วไปคอนกรีตจะเปียกได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก ทำให้ภายในของคอนกรีตไม่สามารถแห้งโดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลตลอดเวลา จึงเกิดขึ้นได้ช้ากว่าคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง สภาพเปียกสลับแห้งมีอิทธิพลโดยตรงต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ รวมไปถึงการได้รับผลกระทบเนื่องจาก ทิศทางการพัดพาของน้ำทะเล กระแสน้ำ อุณหภูมิ ความชื้น แสงอาทิตย์ และลักษณะการใช้งานของโครงสร้าง ซึ่งแต่ละส่วนของโครงสร้างก็ย่อมมีโอกาสสัมผัสกับสภาวะเปียกสลับแห้งที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงสภาพแวดล้อมที่ก่อให้เกิดความเสียหายเนื่องการกัดกร่อนของแต่ละส่วนของโครงสร้าง การที่คอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียก เป็นการเร่งให้คลอไรด์สามารถซึมเข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ด้วยเหตุนี้ คอนกรีตบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) จึงเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์น้อยกว่าบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash zone) คอนกรีตที่สัมผัสน้ำทะเลเป็นบางครั้งบางคราวมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเล เช่น คอนกรีตบริเวณหลักสำหรับผูกเชือก คอนกรีตบริเวณหัวค้ำเพลิงที่ใช้รับน้ำทะเล พื้นที่โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำทะเลในการซักล้าง เป็นต้น

## 2.7 การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีต

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 ( $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ) ดังนั้น จากปฏิกิริยาข้างต้นคลอไรด์ไอออนจะถูกดักจับเมื่อปูนซีเมนต์มีปริมาณ  $C_3A$  สูง หรือ ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก ด้วยเหตุนี้ การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ  $C_3A$  สูง จะช่วยต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ได้ดี ในขณะเดียวกัน การป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต มีความต้องการปริมาณ  $C_3A$  ต่ำ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงปริมาณ  $C_3A$  ในปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมเพื่อป้องกันความเสียหายจากซัลเฟต และเพื่อป้องกันอันตรายจากคลอไรด์ในน้ำทะเลควบคู่กันไป ขณะที่ปัจจุบัน ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์คัดแปลง (ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทสอง) ซึ่งสามารถทนซัลเฟตได้ปานกลาง และให้ความร้อนไม่สูงมากนัก เป็นอีกตัวเลือกในการนำไปใช้งาน บางครั้งการใช้ปูนซีเมนต์ผสมตะกอนเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground granulated blast furnace slag) ก็สามารถช่วยในการดักจับคลอไรด์ไอออน โดยอลูมินเนตที่มีอยู่ในตะกอน (Slag) ทำหน้าที่ในการดักจับ แต่งานวิจัยที่ศึกษาในเรื่องนี้ยังมีจำนวนน้อย การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ  $C_3A$  สูง มีข้อจำกัดตรงที่ เมื่อ  $C_3A$  มีปริมาณสูงย่อมทำให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูง และทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้ง่าย พฤติกรรมดังกล่าวจึงกลายเป็นข้อด้อย และเป็นอันตรายต่อการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ที่ต้องสัมผัสกับน้ำทะเล มาตรฐานการออกแบบ เช่น BS 8110 Part 1 กำหนดปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภททนซัลเฟต โดยมีแนวความคิดที่อยู่บนสมมติฐานที่ว่า คลอไรด์ส่งผลกระทบต่อกระบวนการต้านทานซัลเฟต ซึ่งปัจจุบันได้มีการตรวจสอบสมมติฐานดังกล่าวแล้วว่าไม่ถูกต้อง

เมื่อพิจารณาในเรื่อง ความเข้มข้นคลอไรด์ในน้ำที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต พบว่าที่สภาวะสมดุล ความเข้มข้นของคลอไรด์จะขึ้นอยู่กับไอออนอื่นๆที่กระจายตัวอยู่ในน้ำตามช่องว่าง เช่น ที่ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดค่าหนึ่ง ถ้าไฮดรอกไซด์ไอออนมีความเข้มข้นสูง คลอไรด์อิสระก็就会有ความเข้มข้นสูงด้วย ด้วยเหตุนี้ในบางครั้ง อัตราส่วนระหว่าง  $Cl^-/OH^-$  อาจใช้ในการพิจารณาถึงความก้าวหน้าของการกัดกร่อน แต่ไม่ได้เป็นค่ามาตรฐานในการพิจารณาเรื่องดังกล่าว อีกทั้งมีการพบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในปฏิภาคส่วนผสม เกลือโซเดียมคลอไรด์ ( $NaCl$ ) จะมีปริมาณคลอไรด์อิสระสูงกว่า เกลือแคลเซียมคลอไรด์ ( $CaCl_2$ ) อย่างมีนัยสำคัญ นั่นหมายความว่า น้ำทะเลซึ่งมีเกลือโซเดียมคลอไรด์ละลายอยู่ จะเกิดกัดกร่อนของเหล็กเสริมอย่างแน่นอน เนื่องจากปัจจัยที่มีความหลากหลาย สัดส่วนของคลอไรด์ยึดจับจึงมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงร้อยละ 50 ถึง 80 หรืออาจต่ำกว่าร้อยละ 50 ของคลอไรด์ทั้งหมด ดังนั้น อาจจะไม่เป็นความจริงที่คลอไรด์ยึดจับที่อยู่ในคลอไรด์ทั้งหมดจะไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน

## 2.8 วิธีการวัดคลอไรด์และความต้านทานคลอไรด์

วิธีการทดสอบที่นิยมใช้มีดังนี้

### 2.8.1 การไทเทรต

การไทเทรต (Titration test) เป็นการทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตในระยะความลึกต่างๆ โดยต้องเจาะหรือเอาคอนกรีตบริเวณที่ต้องการหาปริมาณคลอไรด์ไปบดให้ละเอียดและวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ในการแทรกซึมของคลอไรด์มี 2 ลักษณะคือ วิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble chloride) ตาม ASTM C 1152 เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) และทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Water-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 หลังจากเตรียมสารละลายเสร็จ สามารถไทเทรตปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีต ด้วยมือหรือด้วยเครื่อง Potentiometer titration ซึ่งเป็นเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งสามารถคำนวณร้อยละของคลอไรด์ได้ ดังสมการที่ 2.7

$$Cl, \% = \frac{3.545[(V_1 - V_2)N]}{W} \quad (2.7)$$

เมื่อ $V_1$ (มิลลิลิตร)	คือ	ปริมาตรของสารละลาย 0.05 N AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้สำหรับการไทเทรตตัวอย่าง
$V_2$ (มิลลิลิตร)	คือ	ปริมาตรของสารละลาย 0.05 N AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้สำหรับการไทเทรต Blank
$N$	คือ	Exact normality ของสารละลาย 0.05 N AgNO <sub>3</sub>
$W$	คือ	น้ำหนักของผงตัวอย่างคอนกรีต (กรัม)



รูปที่ 2.4 เครื่อง Potentiometer titration

### 2.8.2 ทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์โดยวิธีเร่ง

การทดสอบความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ โดยวิธีเร่ง (Rapid chloride penetration test) ทำได้โดยใช้วิธีทดสอบตาม ASTM C1202 ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ประจุไฟฟ้าที่วิ่งผ่านชั้นคอนกรีตระหว่างสารละลายโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความต่างศักย์ 60 โวลต์ ปริมาณประจุไฟฟ้าวัดเป็นคูลอมป์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการแทรกซึมของคลอไรด์ วิธีนี้สามารถบอกผลได้อย่างรวดเร็วว่าคอนกรีตสามารถต้านทานต่อการแทรกซึมได้มากน้อยเพียงใด โดยอ้างอิงตามเกณฑ์ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และ รูปที่ 2.5 แสดงชุดเครื่องมือทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์โดยวิธีเร่ง

โดยการทดลองใช้ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. หนา 50 มม. และเคลือบอีพอกซี ที่ขอบของตัวอย่าง จากนั้นทำการคู่อากาศออกจากโพรงในเนื้อตัวอย่างเป็นเวลา 3 ชม. และทำให้ตัวอย่างอิมตัวด้วยน้ำอีก 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงได้นำตัวอย่างเข้าทดสอบในเครื่องทดสอบ Rapid Chloride โดยจะวัดค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนในรูปของประจุไฟฟ้าทั้งหมด (Total Charge) ที่ผ่านตัวอย่างในการทดสอบจะใช้เวลา 6 ชั่วโมงต่อหนึ่งชิ้นตัวอย่าง นอกจากการทดลองวัดค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ดังกล่าวแล้วยังสามารถคำนวณหาค่าความพรุน (Porosity) ของตัวอย่างได้อีกด้วยจากสมการ 2.8

$$P(\%) = \frac{100(W_a - W_o)}{(W_a - W_w)} \quad (2.8)$$

เมื่อ

P = ความพรุน (Porosity)

$W_a$  = น้ำหนักตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ

$W^o$  = น้ำหนักตัวอย่างอบแห้งหลังทดสอบในเครื่อง Rapid Chloride Penetration Test  
เสร็จ

$W_w$  = น้ำหนักตัวอย่างที่ชั่งในน้ำ

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานของคุณภาพคอนกรีตในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ตาม ASTM C 1202

Total Charge (Coulombs)	ระดับของการซึมผ่านของคลอไรด์	คุณภาพคอนกรีต
>4000	สูง (High)	แย่ (Poor)
2000-4000	ปานกลาง (Moderate)	ปานกลาง (Moderate)
1000-2000	ต่ำ (Low)	ดี (Good)
100-1000	ต่ำมาก (Very low)	ดีมาก (Very good)
<100	ไม่ซึมผ่าน (Negligible)	ดีเยี่ยม (Excellence)

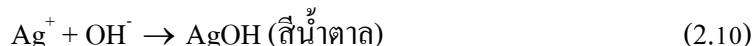




รูปที่ 2.5 เครื่องทดสอบ Rapid chloride penetration test

### 2.8.3 การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีชนิดสี

การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยวิธีชนิดสี (Colorimetric technique) สามารถใช้วัดระดับความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration depth) ในคอนกรีต และเป็นวิธีการทดสอบที่สามารถทำได้สะดวกและรวดเร็ว โดยการฉีดพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท ( $\text{AgNO}_3$ ) บนตัวอย่างทดสอบ ผลการทดสอบจะแสดงให้เห็นเป็นสีขาวและสีน้ำตาล โดยส่วนที่เป็นสีขาวเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง ซิลเวอร์ไอออน ( $\text{Ag}^+$ ) และคลอไรด์ไอออน ( $\text{Cl}^-$ ) ได้ผลิตภัณฑ์เป็น ซิลเวอร์คลอไรด์ ( $\text{AgCl}$ ) ซึ่งมีลักษณะเป็นสีขาว ซึ่งบริเวณที่ปรากฏเป็นสีขาวหลังฉีดพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทแสดงว่ามีการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าถึง ส่วนบริเวณที่ไม่มีเกลือคลอไรด์จะปรากฏเป็นสีน้ำตาลซึ่งเป็นสารประกอบซิลเวอร์ไฮดรอกไซด์ ( $\text{AgOH}$ ) ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างซิลเวอร์ไอออน ( $\text{Ag}^+$ ) กับ ไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ในคอนกรีต ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ 2.9 และ 2.10



#### 2.8.4 การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธี Salt ponding

การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยวิธี Salt ponding ตามมาตรฐาน AASHTO T259 ใช้ระยะเวลาในการทดสอบมากกว่า 90 วัน ขึ้นไป โดยผลการทดสอบจะแสดงในรูปของเส้นกราฟแสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration profile) และสามารถใช้ในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้ การทดสอบโดยวิธีนี้จะวิเคราะห์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยการวัดปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ ด้วยการไทเทรต (Titration test) ตามวิธีที่กล่าวมาข้างต้น หรือใช้หลักการฉีดพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (Colorimetric technique) เพื่อวัดระดับความลึกการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตได้

การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยวิธี Salt ponding ใช้ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. หนา 50 มม. และเคลือบอีพอกซีที่ขอบของตัวอย่าง ทำการบ่มขึ้นเป็นเวลา 14 วัน จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบบ่มในอากาศที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกินร้อยละ 50 เป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้นร้อยละ 3 ก่อนทดสอบความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ที่อายุหลังแช่ 90 วัน

#### 2.8.5 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธี Bulk diffusion test

การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยวิธี Bulk diffusion test (ASTM C1556) ใช้ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75-100 มม. หนาประมาณ 60 มม. และเคลือบอีพอกซีที่ขอบของตัวอย่างทั้งหมด เปิดไว้ 1 ด้าน ทำการบ่มขึ้นเป็นเวลา 14 วัน จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบบ่มในน้ำปูนใส เป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 2.8 โมลาร์ ก่อนทดสอบความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ที่อายุหลังแช่ 35 และ 90 วัน

### 2.9 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์

สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) ในคอนกรีตเป็นตัวบ่งชี้ถึงอัตราการแพร่ของคลอไรด์ที่เข้าไปทำอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยทั่วไปแล้วการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ ( $D_c$ ) สามารถทำได้หลายวิธี โดยแต่ละวิธีก็จะให้ค่าที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์จากเส้นกราฟแสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration profile) นิยมใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) (Chalee, et al., 2009 ; Thomas, et al., 2004) เนื่องจากสามารถคำนวณได้ง่ายและรวดเร็ว

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) โดยหลักที่ถูกต้องแล้ว การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตต้องเป็นลักษณะของการแพร่ที่เป็นการเคลื่อนที่ของคลอไรด์จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งในกรณีของการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไม่ได้อยู่ในลักษณะของการแพร่เพียงอย่างเดียว แต่อาจเกิดขึ้นได้หลายลักษณะควบคู่กันไป เช่น การแพร่ (Diffusion) แรงดันน้ำ (Hydrostatic pressure) และการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรงคาпилลารี (Capillary suction) ของคอนกรีต เป็นต้น ดังนั้น การประยุกต์ใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคเพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่กับการแทรกซึมของคลอไรด์ที่สภาวะดังกล่าว จะไม่นิยมเรียกว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) แต่จะเรียกเป็น สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration coefficient) หรือสัมประสิทธิ์การแพร่ปรากฏของคลอไรด์ (Apparent diffusion coefficient)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้เส้นกราฟแสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ เริ่มจากกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) (Crank, 1975) ดังแสดงในสมการที่ 2.11

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $D_c$  ในสมการที่ 2.11 เป็นค่าคงที่ คำตอบทั่วไปของสมการที่ 2.11 แสดงดังสมการที่ 2.12

$$C_{x,t} = C_o \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \quad (2.12)$$

เมื่อ  $C_{x,t}$  = ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก  $x$  และระยะเวลาที่คอนกรีตสัมผัสกับเกลือคลอไรด์  $t$

$x$  = ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต (มม.)

$t$  = ระยะเวลาที่คอนกรีตสัมผัสกับเกลือคลอไรด์ (วินาที)

$C_o$  = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (chloride concentration at concrete surface) ที่ระยะเวลาแช่  $t$

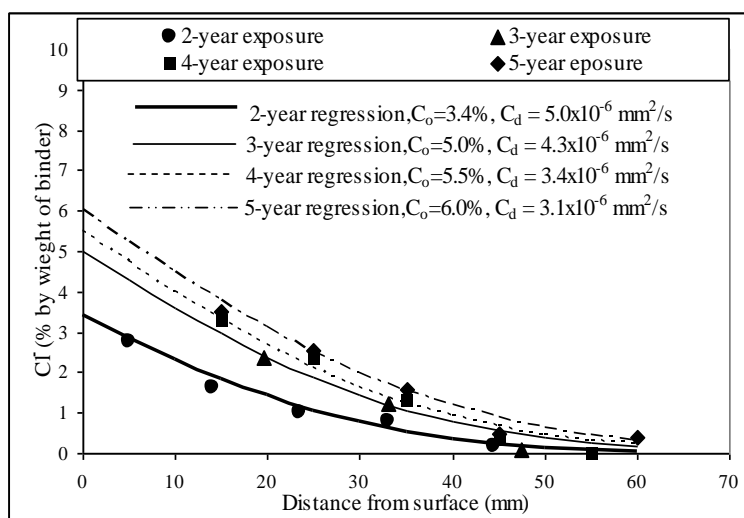
$D_c$  = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระยะเวลาแช่  $t$  (มม<sup>2</sup>/วินาที)

$\operatorname{erf}$  = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error function)

ฟังก์ชันค่าผิดพลาด

โดย 
$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n z^{(2n+1)}}{n!(2n+1)} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( z - \frac{z^3}{3} + \frac{z^5}{10} - \frac{z^7}{42} + \dots \right) \quad (2.13)$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตทำได้โดยการปรับค่า  $D_c$  และ  $C_0$  ในสมการที่ 2.12 เพื่อให้เส้นกราฟที่ได้จากสมการสอดคล้องกับกราฟที่แสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากการทดสอบมากที่สุด ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.6 ที่แสดงการหาค่า  $D_c$  และ  $C_0$  โดยใช้สมการที่ 2.12 ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 2, 3, 4 และ 5 ปี



รูปที่ 2.6 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 2, 3, 4 และ 5 ปี (Chalee, et al., 2009)

ปัจจุบัน มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตเป็นจำนวนมาก ทั้งศึกษาในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม ซึ่งพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์และวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน สภาพแวดล้อมทางกายภาพ ระยะเวลาที่คอนกรีตสัมผัสกับคลอไรด์ และวิธีการที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์

## 2.10 เถ้าถ่านหินและปฏิกิริยาปอซโซลาน

### 2.10.1 เถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหิน หรือ เถ้าลอย ( Fly ash หรือ Pulverized fly ash ) เกิดจากการเผาถ่านหินในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยอุณหภูมิในเตาเผาอยู่ระหว่าง 1,100 ถึง 1,400 องศาเซลเซียส เถ้าถ่านหินจะถูกพัดออกมาตามลมร้อนเพื่อออกไปสู่ปล่องควัน จากนั้นตัวดักจับ (Electrostatic precipitator) จะทำการจับเถ้าถ่านหินไม่ให้เกิดการฟุ้งกระจายออกสู่ภายนอก และจะรวบรวมเถ้าถ่านหินเก็บไว้ในไซโลต่อไป โดยเถ้าถ่านหินที่ได้จะมีอนุภาคเล็กและเป็นทรงกลม แต่เมื่ออุณหภูมิในเตาเผาสูง

ถึง 1,500 ถึง 1,700 องศาเซลเซียส เถ้าที่ได้จะหลอมละลายและบางส่วนจับกันเป็นก้อนใหญ่ ทำให้มีน้ำหนักมากและตกลงสู่ก้นเตา เรียกว่า เถ้าก้นเตา หรือ เถ้าหนัก (Bottom ash)

เถ้าถ่านหินจัดเป็นสารปอซโซลาน โดย ASTM C618 ได้นิยามสารปอซโซลาน หมายถึงวัสดุที่มีซิลิกา (Siliceous) หรือซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยปกติแล้วสารปอซโซลานไม่มีความสามารถในการยึดประสานหรือมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เมื่อสารปอซโซลานมีความละเอียดสูงและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่แข็งตัวมีคุณสมบัติในการยึดประสานได้เช่นกัน

ในส่วนของคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าถ่านหิน ASTM C618 ได้แบ่งเถ้าถ่านหินที่ใช้ในงานคอนกรีตออกเป็น 2 ชนิด คือ Class F และ Class C โดยอาศัยองค์ประกอบทางเคมีเป็นหลักสำคัญ กล่าวคือ Class F ต้องมีออกไซด์ของ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  รวมกันไม่ต่ำกว่าร้อยละ 70 โดยมากเกิดจากการเผาถ่านหินประเภท แอนทราไซต์ (Anthracite) และบิทูมินัส (Bituminous) มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 5 ดังนั้นเถ้าถ่านหินประเภทนี้บางครั้งจะเรียกว่า Low – calcium fly ash กล่าวคือเป็นเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำและมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์อยู่น้อยหรือแทบจะไม่มีเลย แต่ยังมีคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติการรับแรงของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินประเภทนี้แทนที่ปูนซีเมนต์ พบว่า การพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงต้นจะต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่หลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้น กำลังรับแรงอัดในช่วงปลายของคอนกรีตที่ได้รับการผสมด้วยปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะพัฒนาเท่าเทียมกับคอนกรีตธรรมดา ส่วน Class C ต้องมีออกไซด์ของ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  รวมกันไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาถ่านหินประเภท ลิกไนต์ (Lignite) และซับบิทูมินัส (Sub - bituminous) มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 15 ถึง 23 ดังนั้นเถ้าถ่านหินประเภทนี้บางครั้งจะเรียกว่า High – calcium fly ash ซึ่งมีคุณสมบัติของซีเมนต์และปอซโซลานในตัวเอง กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินประเภทนี้แทนที่ปูนซีเมนต์จะพัฒนาได้อย่างรวดเร็วในช่วงต้น

#### 2.10.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นหลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กล่าวคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำปฏิกิริยารวมตัวกับซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$  และอลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ที่มีอยู่ในเถ้าถ่านหินจนทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมินไฮเดรต (C-A-H) ตามลำดับ ดังสมการที่ (2.14) และ (2.15)



โดยที่ค่า  $x, y, z$  เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมินไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ส่งผลให้เฟสที่ผสม

เถ้านหินมีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้น และความสามารถในการรับกำลังอัดสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ ล้วนเป็นเพราะการรวมของสารประกอบทั้งสองดังกล่าวที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน สำหรับการทดสอบหาค่าปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นหาได้จากอัตราส่วนร้อยละระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้านหินกับมอร์ตาร์มาตรฐาน ซึ่งค่าดังกล่าวเรียกว่า “ดัชนีกำลัง” โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อย ๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครึ่งก็ตาม

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตมีผลการศึกษาทั้งในห้องปฏิบัติการ และในภาคสนาม ซึ่งการศึกษาในห้องปฏิบัติการส่วนใหญ่เป็นการทดสอบที่ใช้ระยะเวลาไม่นานมาก และผลการทดสอบส่วนใหญ่จะแสดงแนวโน้มของการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานต่างชนิดกัน ซึ่งการใช้วัสดุปอซโซลานผสมในคอนกรีตสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์เป็นไปในทิศทางที่ดี แต่การศึกษาในภาคสนามเป็นการแข่งตัวอย่างคอนกรีตในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลภายใต้การกัดกร่อนตามธรรมชาติที่ไม่มีแรง ซึ่งในต่างประเทศได้มีการเก็บข้อมูลยาวนานมากกว่า 10 ปี โดย Thomas, et al., 2004 ได้ทำการเก็บข้อมูลคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี คอนกรีตดังกล่าวแช่น้ำทะเลอยู่ที่ Building Research Establishment (BRE) บริเวณปากแม่น้ำ Thames Estuary เมือง Shoeburyness ประเทศอังกฤษ โดยหล่อคอนกรีตซึ่งฝังแท่งเหล็กไว้ภายใน และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้านหินปริมาณร้อยละ 0 ถึง 50 จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่น้ำทะเล ผลปรากฏว่าอัตราการแพร่กระจายและการกัดกร่อนเหล็กเสริมมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มเริ่มต้น แต่เมื่อแช่น้ำทะเลนานๆจะมีผลไม่แตกต่างกัน อัตราการแพร่กระจายของคลอไรด์และการสูญเสียน้ำหนักเหล็กเสริมเนื่องจากการกัดกร่อนในคอนกรีตผสมเถ้านหินมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา และยังลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้านหินมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินร้อยละ 30 และ 50 มีค่าลดต่ำลงในช่วงระยะเวลาการแช่น้ำทะเล 2 ถึง 10 ปี เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ส่วนในประเทศไทย กิรติกร เจริญพร้อม และ วิเชียร ชาลี (2554) ได้ศึกษาความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลาต่าง ๆ กัน โดยใช้คอนกรีตควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้านหินแม่เกาะในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเหมือนกับคอนกรีตควบคุม หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200 มม.3 เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยบ่มคอนกรีตในน้ำจืดมีอายุครบ 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเล จ.

ชลบุรี หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งครบ 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี ได้ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย จากข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีต สามารถหาความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุแช่ในน้ำทะเลต่างๆ ได้ ผลการวิจัยพบว่า ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์มีอัตราการเพิ่มที่สูงในช่วง 5 ปีแรกที่คอนกรีตแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล การแทนที่เถ้านหิน ในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ลดลงอย่างชัดเจนนอกจากนั้นอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ส่งผลต่อการลดความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินตลอดจนกำลังอัดที่สูงขึ้นมีผลต่อการลดความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน นอกจากนี้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และผสมเถ้านหินร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถช่วยป้องกันการกัดกร่อนในคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสสิ่งแวดล้อมทะเลได้ดี เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี (กำลังอัดสูง) ควบคู่กับคุณสมบัติด้านความคงทนที่ดี (ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำ)

วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2551) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีเร่งกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ซึ่งวัดค่าการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออนในรูปของประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ผ่านตัวอย่าง (ตามมาตรฐาน ASTM C1202) เปรียบเทียบกับการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยวิธีการไตรเตรทและใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (ตามมาตรฐาน ASTM C1152) โดยทำการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ตามวิธีดังกล่าวในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้านหินที่ผ่านการแยกขนาดและไม่ผ่านการแยกขนาดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 และ 0.55 ผลการศึกษาพบว่า การแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีเร่ง และการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยการไตรเตรทให้ผลในทิศทางที่สอดคล้องกัน กล่าวคือความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ดีขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อแทนที่เถ้านหินในปริมาณที่มากขึ้นและละเอียดขึ้น ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าทั้งหมด (Total charge) ที่ผ่านตัวอย่างทดสอบโดยวิธีเร่งการซึมผ่านคลอไรด์ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่มีความต้านทานคลอไรด์ได้ต่ำ มากกว่าในกลุ่มคอนกรีตที่สามารถต้านทานคลอไรด์ได้สูง

วิเชียร ชาลี และ ชีรพงษ์ เชื้อพลบ (2554) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิกในการประเมินความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้านหินจากแม่เมาะในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 0.55 และ 0.65 โดยใช้ส่วนผสมเดียวกับคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเมื่อ 10 ปี ที่แล้ว หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 100 มม x 200 มม เพื่อทดสอบความแน่นของตัวอย่างคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ที่อายุคอนกรีต 28 และ 90 วัน เพื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อายุแช่น้ำทะเล 10 ปี พบว่า การใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกมีแนวโน้มลดลงที่อายุ 28 วัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่อายุ 90 วัน อายุของคอนกรีตที่นานขึ้นส่งผลให้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินเพิ่มขึ้นชัดเจนกว่าคอนกรีตธรรมดา ตลอดจนการศึกษาครั้งนี้สามารถประเมินคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ทดสอบโดย RCPT และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินเพิ่มขึ้นร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 จากผลการทดสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก

Chalee, et al., 2010 ได้ศึกษาการใช้เถ้านหินแม่เมาะในการป้องกันการทำลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลในประเทศไทย โดยทำการเก็บตัวอย่างถึงระยะเวลา 7 ปี ซึ่งผลการศึกษาพบว่า เถ้านหินมีศักยภาพในการใช้ป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการแทนที่เถ้านหินที่มากขึ้นส่งผลให้ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลจะลดลงอย่างชัดเจน และเมื่อระยะเวลาแช่น้ำทะเลนานขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์ มีค่าลดลง และชัดเจนในคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้านหินมากกว่าในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อพิจารณาข้อมูลถึง 7 ปี คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงถึง 0.65 สามารถใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลได้เมื่อผสมเถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 25-50 เพราะให้ผลในการต้านทานการทำลายเหล็กเสริมเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลดีเทียบเท่ากับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้านหินที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

คอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเลจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติด้านการกักเก็บคลอไรด์ของวัสดุประสานด้วย เนื่องจากวัสดุประสานที่สามารถกักเก็บคลอไรด์ได้ดีจะสามารถปล่อยคลอไรด์อิสระที่มีผลต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมในปริมาณต่ำ ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตเสริมเหล็กมีความคงทนมากขึ้น โดย Cheewaket, et al., 2010 พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้น มีผลให้การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตสูงขึ้น ซึ่งส่งผลดีต่อการต้านทานการกัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล

ในการทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งการทดสอบในห้องปฏิบัติการส่วนใหญ่จะมีการเร่งการแทรกซึมภายใต้ระยะเวลาที่จำกัด เพื่อให้ได้ผลการศึกษาที่เร็ว ซึ่งส่วนใหญ่จะทราบแนวโน้มของการต้านทานในสภาวะเร่ง ซึ่งจะแตกต่างจากปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์จริงที่อยู่ในธรรมชาติ การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยวิธี Bulk diffusion test (ASTM C1556) เป็นอีกวิธีที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งใช้ระยะเวลาในการทดสอบ 35 วัน และ 90 วัน โดยผลการทดสอบจะแสดงในรูปของเส้นกราฟแสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration profile) และสามารถใช้ในการ



วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้ การทดสอบโดยวิธีนี้จะวิเคราะห์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยการวัดปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ ด้วยการไทเทรต (Titration test) หรือใช้หลักการฉีดฟอสฟอรัสละลายซิลเวอร์ไนเตรท (Colorimetric technique) เพื่อวัดระดับความลึกการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตได้

## บทที่ 3

### วิธีการศึกษา

บทนี้กล่าวถึงระเบียบวิธีที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งประกอบด้วย วัสดุ และการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการศึกษา อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการทดสอบในแต่ละขั้นตอน ซึ่งแยกเป็นรายละเอียด ดังนี้

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตาม มอก.15-2532
2. ใยถักใยหิน ใช้ใยถักใยหินแม่เมาะ
3. หินปูนย่อยขนาดใหญ่สุด เท่ากับ 19 มม.
4. ทรายแม่น้ำ ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4
5. น้ำประปา
6. สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบปริมาณคลอไรด์ ได้แก่ โพแทสเซียมโครเมต ( $K_2CrO_4$ ) ซิลเวอร์ไนเตรต ( $AgNO_3$ ) โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $NaHCO_3$ ) และแคลเซียมคาร์บอเนต ( $CaCO_3$ ) และ โซเดียมคลอไรด์ ( $NaCl$ )

#### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องบดวัสดุ
2. แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม.
3. ชุดทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ หิน ทราย
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
5. ตู้อบปรับอุณหภูมิได้
6. ตะแกรงร่อนมาตรฐาน (แสดงดังรูปที่ 3.1 ก)
7. เครื่องตัดคอนกรีต (แสดงดังรูปที่ 3.1 ข)
8. เครื่องชั่งน้ำหนัก (แสดงดังรูปที่ 3.1 ค)
9. เครื่องต้มสาร (แสดงดังรูปที่ 3.1 ง)
10. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาดต่างๆ (แสดงดังรูปที่ 3.1 จ)
11. ขวดชมพู (แสดงดังรูปที่ 3.1 ฉ)
12. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) (แสดงดังรูปที่ 3.1 ช)
13. กระจกทรง (แสดงดังรูปที่ 3.1 ฉ)

14. ปิเปตต์ (pipette)
15. กระจกตวง
16. แท่งแก้ว ที่ตักสาร
17. ครกหิน (แสดงดังรูปที่ 3.1 ข)
18. บิวเรตต์ (แสดงดังรูปที่ 3.1 ซ)
19. กรวยกรอง (แสดงดังรูปที่ 3.1 ฉ)
20. หลอดหยด (Dropper)
21. เครื่องดูดสุญญากาศ (แสดงดังรูปที่ 3.1 ญ)
22. กระจกน็อค
23. กราฟและปากกาเขียนพลาสติก



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)



(ช)



(ซ)



(ฅ)



(ญ)

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

### 3.3 วิธีการทดสอบ

#### 3.3.1 คุณสมบัติของวัสดุ

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตตามวิธีของ American Concrete Institute (ACI) โดยออกแบบให้คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว เป็นคอนกรีตควบคุม มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 , 0.55 และ 0.65 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้มีคอนกรีตที่ทำการศึกษา 15 ส่วนผสม แสดงอัตราส่วนผสม

คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาดังตารางที่ 3.1 ซึ่งเป็นส่วนผสมเดียวกับส่วนผสมคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเมื่อ 12 ปีที่แล้ว

### 3.3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ โดยวิธี Bulk diffusion test

การเตรียมตัวอย่างการแทรกซึมของคลอไรด์ ทำการหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. จำนวน 15 ส่วนผสม เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ โดยวิธี Bulk diffusion test (ASTM C1556) โดยแบ่งการทดสอบเป็นสองวิธีคือ Chloride penetration profile และ Colorimetric technique ซึ่งทำการทดสอบหลังแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 2.8 โมลาร์ เป็นเวลา 35 และ 90 วัน

หลังจากทำการหล่อคอนกรีตแล้วเสร็จ ทำการบ่มขึ้นเป็นเวลา 14 วัน ได้นำคอนกรีตไปบ่มในน้ำปูนใสจนอายุคอนกรีตครบ 28 วัน แล้วจึงนำมาเคลือบอีพอกซีที่ขอบของตัวอย่างทั้งหมด เปิดไว้ 1 ด้าน หลังจากนั้นแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 2.8 โมลาร์ เป็นเวลา 35 วัน และ 90 วัน หลังจากนั้นตัดชิ้นตัวอย่าง เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยการใช้กรดเป็นตัวทำลายตามมาตรฐาน ASTM C1218 และการฉีดพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (Colorimetric technique) โดยการใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ความเข้มข้น 0.1N ฉีดลงบนผิวของคอนกรีตที่ทำการสกัดเตรียมผิวไว้แล้ว

#### 3.3.2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

1. ตัดก้อนตัวอย่าง (แสดงดังรูปที่ 3.2 ก)
2. เจียรผิวหน้าคอนกรีต
3. ทำการบ่มขึ้น
4. ทำการเคลือบผิวที่ขอบด้วยอีพอกซี โดยเปิดด้านทิ้งไว้ 1 ด้าน(แสดงดังรูปที่ 3.2 ข)
5. นำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 2.8 โมลาร์ เป็นเวลาอีก 35 วัน และ 90 วัน (แสดงดังรูปที่ 3.2 ค)



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก/ม <sup>3</sup> )					อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุ ประสาน (W/B)
	ปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่าน หิน	ทราย	หิน	น้ำ	
I45	478	-	639	1024	215	0.45
I55	478	-	639	971	262	0.55
I65	478	-	639	922	311	0.65
I45FA15	406	072	639	1004	215	0.45
I45FA25	359	119	639	99	215	0.45
I45FA35	311	167	639	977	215	0.45
I45FA50	239	239	639	957	215	0.45
I55FA15	406	072	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
I55FA15	406	072	639	898	311	0.65
I55FA25	359	119	639	881	311	0.65
I55FA35	311	167	639	864	311	0.65
I55FA50	239	239	639	84	311	0.65

### 3.3.2.2 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

เนื่องจากตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แบ่งออกเป็นหลายประเภท ดังนั้นจึงได้กำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษาในแต่ละประเภทเพื่อความชัดเจน ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สัญลักษณ์ของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

สัญลักษณ์	ความหมาย
I	คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งเป็นวัสดุประสาน
FA	เถ้าถ่านหินแม่เมาะ
45, 55, 65	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ
15, 25, 35, 50	คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

รูปแบบสัญลักษณ์ของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้คือ I/A/FA/B โดย A เป็นส่วนที่ใช้บอกถึงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และ B เป็นส่วนที่แสดงถึงอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน ยกตัวอย่างเช่น

สัญลักษณ์ I65 หมายถึง คอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งเป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65

สัญลักษณ์ I45FA15 หมายถึง คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแม่เมาะ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ในอัตราส่วนร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

### 3.3.3 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต โดยวิธี Bulk diffusion test

1) เมื่อแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 2.8 โมลาร์ จนมีอายุครบ 35 วัน และ 90 วัน นำตัวอย่างทรงกระบอกมาตัดเป็นชั้นจากผิวบนไปยังแนวกึ่งกลาง โดยในแต่ละชั้นหนา 10 มม. ทั้งหมด 5 ชั้น (แสดงดังรูปที่ 3.3)

2) นำตัวอย่างคอนกรีตที่ตัดบริเวณกึ่งกลางของแต่ละชั้นมาบดให้ละเอียด

3) เก็บตัวอย่างคอนกรีตที่บดละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 20 เพื่อนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายตาม ASTM C 1218



รูปที่ 3.3 การตัดตัวอย่างคอนกรีตเป็นชิ้นๆหนาชั้นละ 10 มม. เพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์

### 3.3.3.1 หลักการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

การทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตใช้การไทเทรตด้วยซิลเวอร์ไอออนตามวิธีของมอร์ (Mohr's method) วิธีนี้จะเกิดตะกอนที่มีสีแดงของเกลือที่ไม่ละลาย ณ จุดยุติ นิยมใช้การไทเทรตหาคลอไรด์ด้วยสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต โดยการเติมโครเมตไอออน ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) ซึ่งเป็นอินดิเคเตอร์ในสารละลายที่เป็นกลางของสารละลายตัวอย่างคลอไรด์ เมื่อไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต จะเกิดตะกอนสีขาว ซิลเวอร์คลอไรด์ ( $\text{AgCl}$ ) ก่อน ดังสมการ 3.1 เมื่อตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ตกสมบูรณ์แล้ว หยดต่อไปของซิลเวอร์ไนเตรตจะทำให้เกิดตะกอนสีแดงของ  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$  ดังสมการ 3.2 ซึ่งละลายได้มากกว่าตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์



### 3.3.3.2 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

การศึกษาครั้งนี้ได้ทดสอบหาการแทรกซึมของปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตแต่ละชั้นโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 ดังนี้

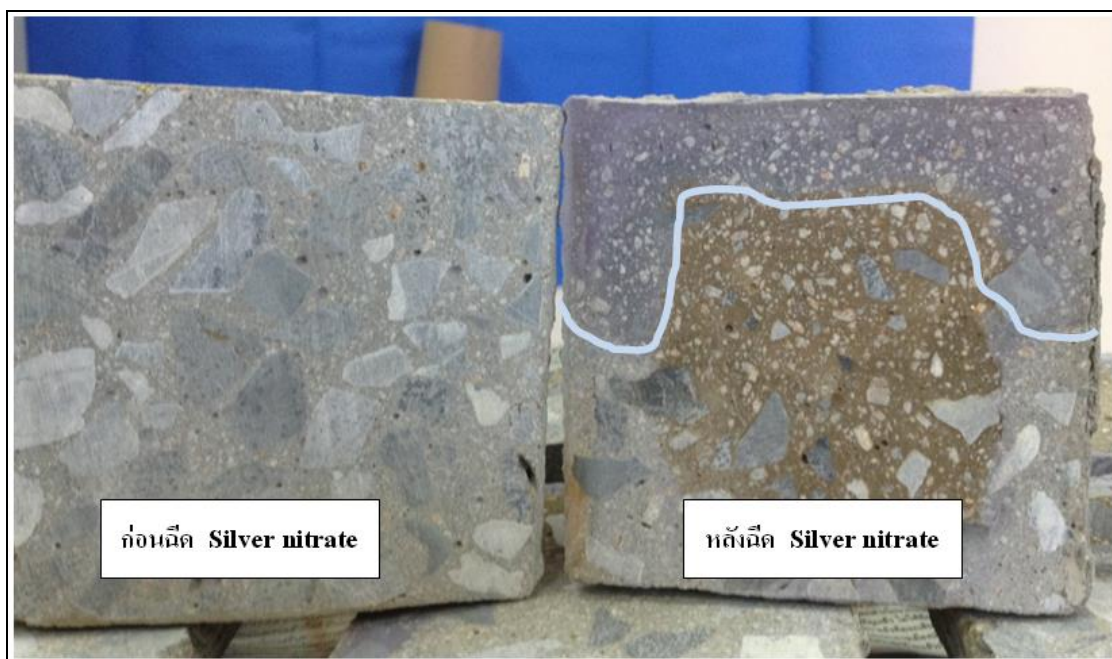
- 1) นำตัวอย่างคอนกรีตที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัมโดยชั่งละเอียด 0.01 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 2) เติมน้ำกลั่นปริมาณ 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์



- 3) คนให้เข้ากันประมาณ 1 – 2 นาที
- 4) นำไปต้มให้เดือดประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
- 5) นำไปกรองผ่านกระดาษกรองใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น
- 6) บีบคัตต์ ตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ไปใส่ในขวดทดลองรูปชมพู่
- 7) เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2CrO_3$ ) 5% ลงไป 1 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $NaHCO_3$ ) 2% ลงไป 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปไทเทรต
- 8) ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $AgNO_3$ ) จนเป็นสีส้ม
- 9) บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $AgNO_3$ ) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีต

#### 3.3.4. การทดสอบความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ โดยวิธี Colorimetric technique

- 1) เมื่อแช่ตัวอย่างคอนกรีตใน  $NaCl$  เข้มข้น 2.8 โมลาร์ ครบ 35 วัน และ 90 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกมาผ่าครึ่ง
- 2) เตรียมสารละลาย Silver nitrate 0.1 N โดยการชั่ง Silver nitrate จำนวน 1.6987 g ใส่ volumetric flask ขนาด 100 ml. ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเขย่าให้เข้ากัน
- 3) นำตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่าครึ่งแล้วมาวางเรียงกันและฉีด Silver nitrate 0.1 N ลงบนผิวตัวอย่างที่เตรียมไว้ โดยฉีดทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที และวัดความลึกการแทรกซึมของคลอไรด์จากค่าเฉลี่ยของความลึกบริเวณที่เป็นสีขาวขุ่นดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การทดสอบ โดยวิธี Colorimetric technique

### 3.4 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์เมื่อแช่น้ำทะเลครบ 12 ปี

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี ได้นำตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเก่าผ่านหินที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี มาเจาะบริเวณกึ่งกลางของก้อนตัวอย่าง แล้วนำแท่งคอนกรีตที่ได้จากการเจาะมาตัดเป็นชิ้นตามระยะความลึกต่างๆ โดยให้ลึกลงไปประมาณ 80 มม. (ตัดตัวอย่างหนาชิ้นละ 10 มม.) จากนั้นบดตัวอย่างคอนกรีตแต่ละชิ้นให้ละเอียด และนำผงคอนกรีตที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 มาทดสอบปริมาณคลอไรด์ โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM C 1218 ดังที่กล่าวมาข้างต้น การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลที่อายุ 12 ปี แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลที่อายุ 12 ปี

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion ผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion ความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Colorimetric technique ตลอดจน การประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตระยะยาวจากผลทดสอบ โดยวิธี Bulk diffusion

#### 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหินและมวลรวม

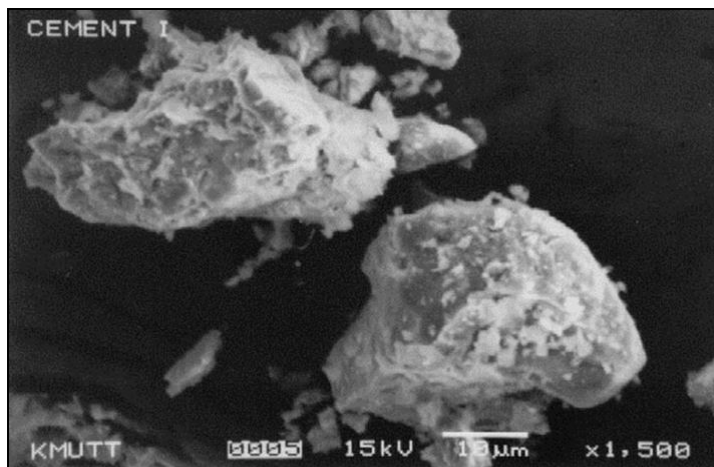
##### 4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

##### 4.1.1.1 ลักษณะวัสดุประสาน

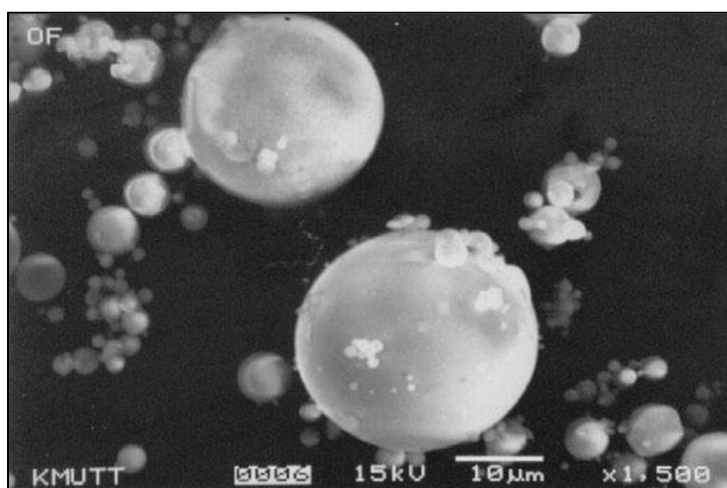
ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นผงละเอียดและมีสีเทา ส่วนลักษณะทางกายภาพของเถ้าถ่านหินพบว่ามีลักษณะเป็นฝุ่นละเอียดและมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีสีน้ำตาลปนเทา

##### 4.1.1.2 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

เมื่อพิจารณารูปร่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าถ่านหิน จากภาพที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมผิวขรุขระ แต่ละอนุภาคมีลักษณะเหลี่ยมมุมที่ไม่เหมือนกัน และอนุภาคจะมีหลายขนาดปะปนกัน (ดังรูป 4.1) ส่วนเถ้าถ่านหินแม่เมาะพบว่า อนุภาคมีลักษณะทรงกลม ผิวเรียบ มีขนาดเล็กและใหญ่กระจายอยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากการเผาถ่านหินด้วยเตาแบบ PCC (Pulverized Coal Combustion) ซึ่งใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,100 °C ในการเผาไหม้ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงมาก ทำให้เถ้าถ่านหินเกิดการหลอมเหลวจนเป็นทรงกลมตัน (ดังรูป 4.2)



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 4.2 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

#### 4.1.1.3 ความละเอียด

เมื่อพิจารณาความละเอียดของเถ้าถ่านหิน โดยการหาปริมาณอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) ดังตารางที่ 4.1 พบว่า เถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีปริมาณอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 31 พื้นที่ผิวจำเพาะวิธีของเบลนเท่ากับ 2,860 ซม.<sup>2</sup>/ก. เห็นได้ว่าปริมาณอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดไว้คือไม่เกินร้อยละ 34 ซึ่งสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ ซึ่งความละเอียดที่มากจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นได้เร็วและสมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งจะทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีการพัฒนากำลังอัดที่ดี และมีแนวโน้มในการต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงได้ดีขึ้น ส่วนความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าน้ำหนักค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 20 พื้นที่ผิวจำเพาะวิธีของเบลนเท่ากับ 3,250 ซม.<sup>2</sup>/ก.

#### 4.1.1.4 ความถ่วงจำเพาะ

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของวัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ปกติของปูนซีเมนต์ คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 ส่วนเถ้าถ่านหินแม่เมาะมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.22

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดวัสดุที่ใช้ศึกษา

วัสดุประสาน	ความถ่วงจำเพาะ	ร้อยละค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325	พื้นที่ผิวจำเพาะวิธีของเบลน (ชม. <sup>2</sup> /ก.)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	3.15	20	3,250
เถ้าถ่านหิน	2.22	32	2,860

#### 4.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหิน พบว่า ผลรวมของออกไซด์หลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) อลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เท่ากับร้อยละ 96.30 มาตรฐาน ASTM C 150 กำหนดว่า ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ต้องไม่เกินร้อยละ 4.0 ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องไม่เกินร้อยละ 3.0 และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องไม่เกินร้อยละ 3.0 ซึ่งพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งที่นำมาใช้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดทั้งหมด

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เท่ากับร้อยละ 74.34 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.11 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน
Silicon Dioxide, SiO <sub>2</sub>	21.52	35.12
Aluminum Oxide,	3.56	21.51
Iron Oxide, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.51	17.71
Calcium Oxide, CaO	66.70	17.15
Magnesium Oxide,	1.06	-
Sodium Oxide, Na <sub>2</sub> O	0.10	0.69
Potassium Oxide, K <sub>2</sub> O	0.24	1.59
Sulfur Trioxide, SO <sub>3</sub>	2.11	2.13
Loss On Ignition, LOI	1.74	0.11

#### 4.1.3 คุณสมบัติของมวลรวม

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของมวลรวม

คุณสมบัติ	มวลรวมละเอียด	มวลรวมหยาบ
โมดูลัสความละเอียด	2.75	6.89
ความถ่วงจำเพาะ	2.62	2.73
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	0.91	0.45
ความหนาแน่น (กก./ม <sup>3</sup> )	1725	1650
ช่องว่าง (%)	33.9	39.3
การสูญเสียการซัดสี (%)	-	23

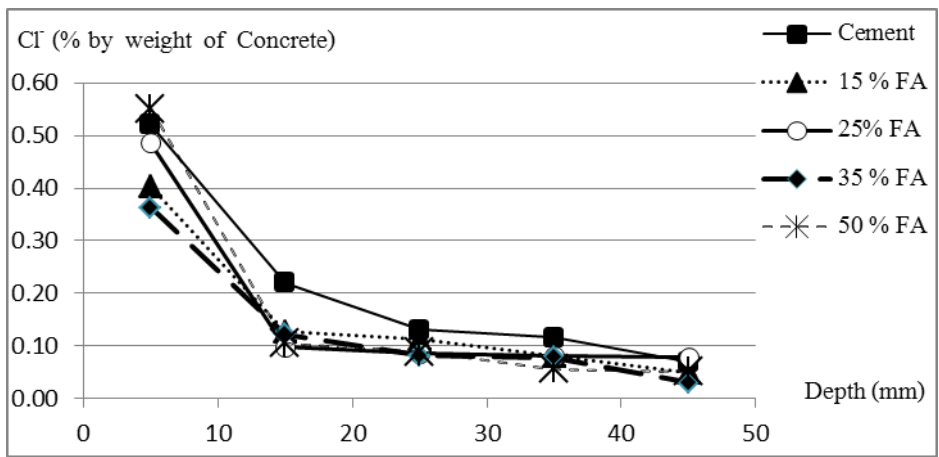
#### 4.2 ผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion

เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อายุ 35 และ 90 วัน ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าลดลงโดยมีแนวโน้มเหมือนกันในทุก W/B แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลดีต่อคุณสมบัติทางด้านความคงทนของคอนกรีต โดยสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกา

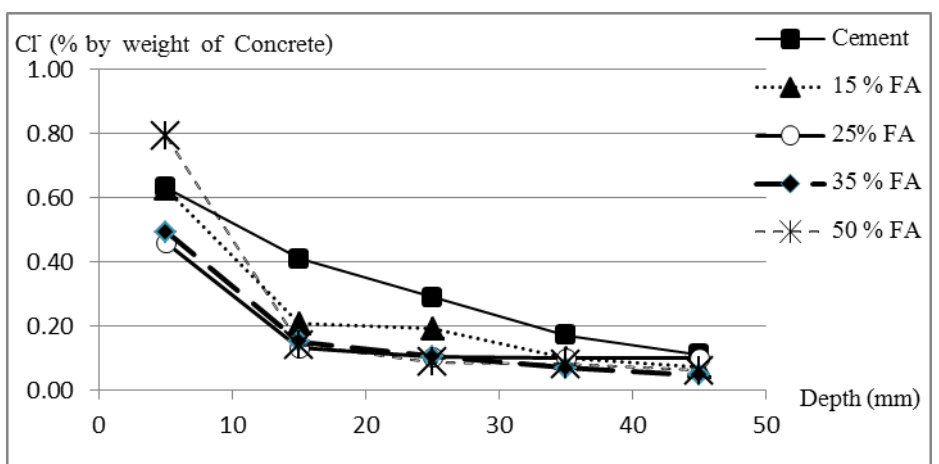
และอลูมินาในเถ้าถ่านหินทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาดังกล่าวคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮดรต (C-A-H) ซึ่งจะช่วยลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลงทำให้เนื้อคอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น (Neville, 1996; Sata et al., 2012) โดยจะส่งผลดีต่ออายุคอนกรีตในระยะยาว จากรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ที่แสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่อายุ 35 วันและ 90 วัน ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ตามลำดับ พบว่าปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์มีแนวโน้มลดลงโดยจะเห็นผลชัดเจนตั้งแต่ระดับความลึก 20 มม. จากผิวหน้าของคอนกรีตด้านที่สัมผัสกับสารละลายคลอไรด์โดยตรงซึ่งที่ระดับความลึก 5 มม. ถึง 15 มม. ปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์มีแนวโน้มลดลงมากที่สุดและจะเริ่มคงที่ ที่ระดับความลึก 15 มม. เป็นต้นไป ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันทั้ง 3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ( $W/B = 0.45, 0.55$  และ  $0.65$ ) เมื่อพิจารณาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่อายุ 35 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ระดับความลึก 25 มม. พบปริมาณคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 0.29, 0.19, 0.10, 0.10 และ 0.09 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้น และสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมาของ Chalee และคณะ (2009) ที่ได้ทดสอบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะไม่แยกขนาด และแยกขนาดละเอียดซึ่งเป็นเถ้าถ่านหินที่ถูกเผาที่อุณหภูมิสูง และมีคุณภาพดี ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 แล้วนำไปแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราที่สูงขึ้นสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้นทั้งแบบไม่แยกขนาด และแยกขนาดละเอียด

ส่วนที่ระดับความลึก 0 ถึง 15 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ที่ทดสอบที่อายุ 35 วันและ 90 วัน ตามลำดับ พบปริมาณคลอไรด์มีความแปรปรวนค่อนข้างสูง เนื่องจากใกล้ผิวของคอนกรีตมากเกินไปและไม่สามารถวิเคราะห์ผลของเถ้าถ่านหินต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ชัดเจน

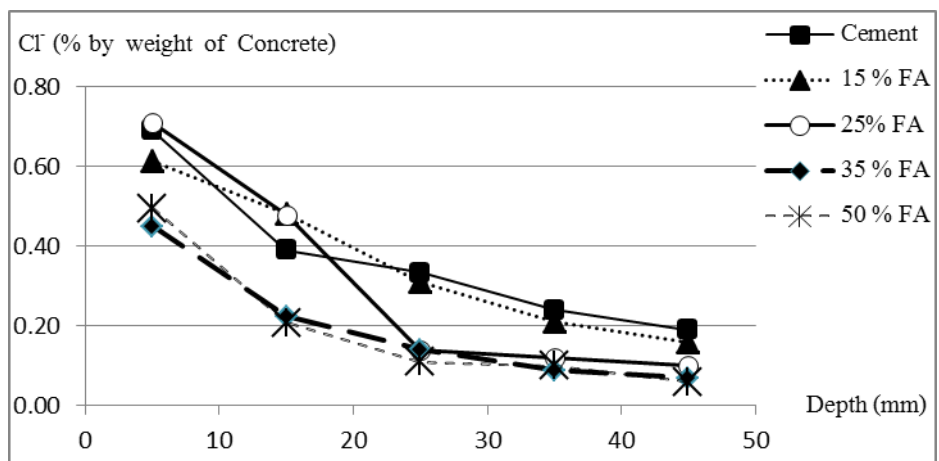
ในการศึกษาครั้งนี้ให้ผลไปในทิศทางเดียวกันทั้งการทดสอบที่อายุ 35 วัน และ 90 วัน กล่าวคือ การแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นมีแนวโน้มทำให้การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง อย่างไรก็ตาม การทดสอบที่อายุ 90 วัน (ดังรูปที่ 4.4) จะเห็นแนวโน้มดังกล่าวนี้ ชัดเจนมากกว่าที่อายุ 35 วัน ทั้งนี้เป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้น เมื่อคอนกรีตอายุ 90 วัน จะให้ผลที่ชัดเจนและส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำชัดเจนกว่าที่อายุ 90 วัน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)



(ก) W/B = 0.45



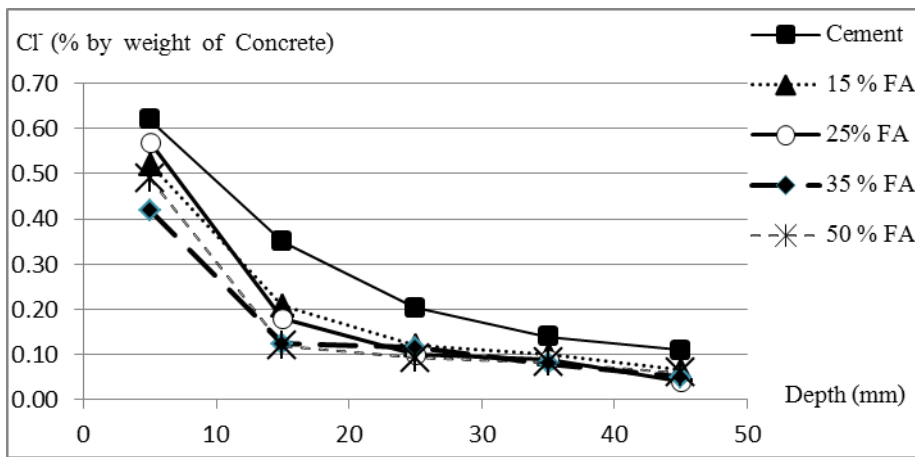
(ข) W/B = 0.55



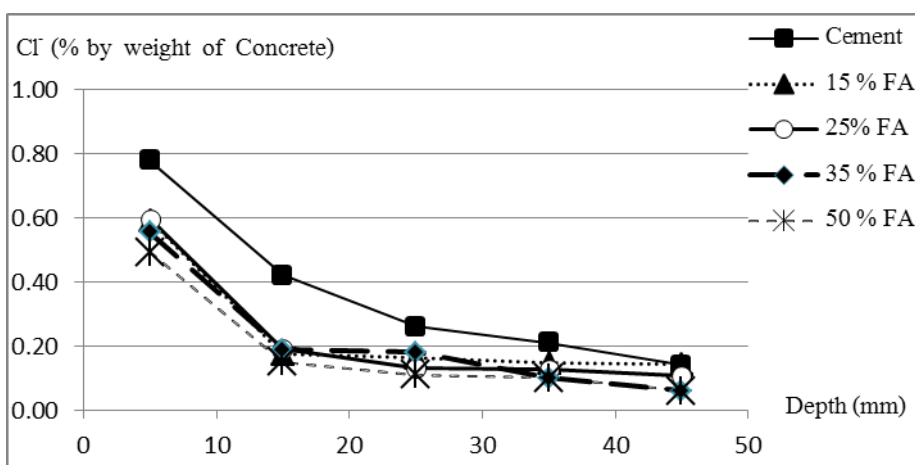
(ค) W/B = 0.65

รูปที่ 4.3 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบ โดยวิธี Bulk diffusion test เป็นเวลา 35 วัน

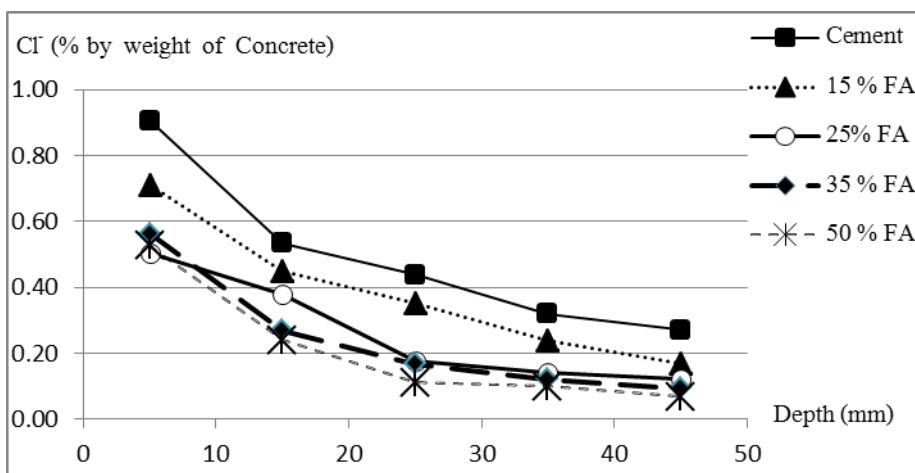




(น) W/B = 0.45



(ข) W/B = 0.55



(ค) W/B = 0.65

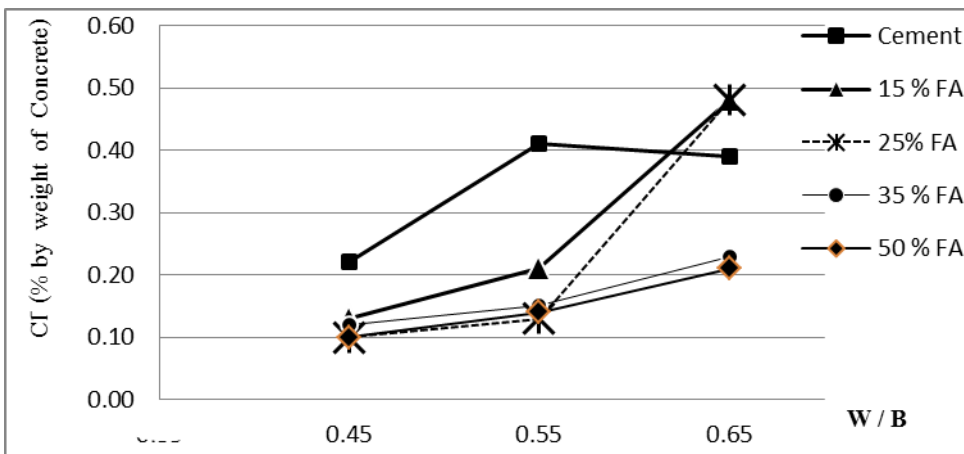
รูปที่ 4.4 การแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test เป็นเวลา 90 วัน

#### 4.3 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion

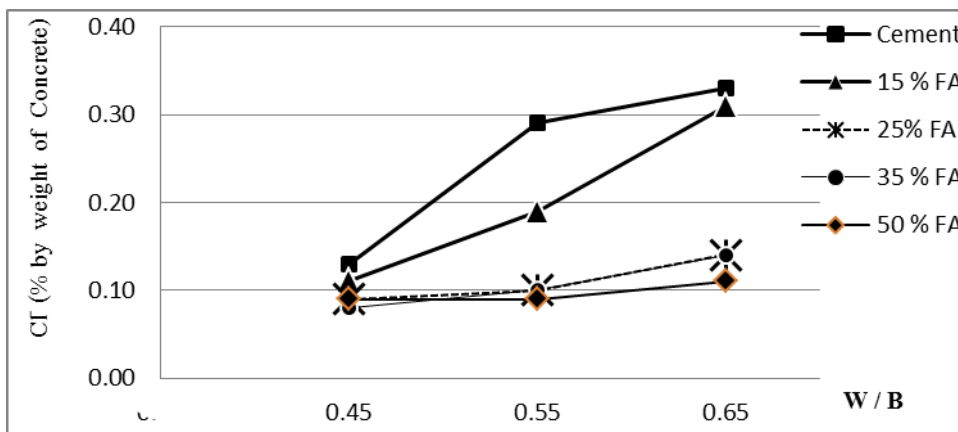
เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ที่อายุ 35 และ 90 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ตามลำดับ พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลงส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆ ลดลงและมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งอายุ 35 และ 90 วัน ซึ่งเป็นผลจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นและลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ พิจารณาปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 15 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) พบว่าปริมาณคลอไรด์ค่อนข้างมีความแปรปรวนและยังไม่เห็นผลที่ชัดเจน เนื่องจากระยะความลึกที่ใช้ในการทดสอบใกล้ผิวหน้าเกินไป เมื่อพิจารณาปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกที่มากขึ้น (25 มม.) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข) จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน โดยสังเกตจาก W/B ที่ลดลงจาก 0.55 เป็น 0.45 ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ลดลงร้อยละ 0.16 (ลดลงจาก 0.29 ในคอนกรีตที่มี W/B = 0.55 เป็น 0.13 ในคอนกรีตที่มี W/B = 0.45 ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าการลดลงของ W/B จาก 0.55 เป็น 0.45 ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ลดลงเท่ากับร้อยละ 0.08 (ลดลงจาก 0.19 ในคอนกรีตที่มี W/B = 0.55 เป็น 0.11 ในคอนกรีตที่มี W/B = 0.45) และมีแนวโน้มเหมือนกันกับปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมที่ระดับความลึก 35 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ค) โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานยังมีผลต่อการลดลงของคลอไรด์ที่แทรกซึมในคอนกรีตธรรมดา มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน การที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เป็นผลจากความทึบน้ำในคอนกรีตธรรมดาคะขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็นหลัก (Neville, 1996) ส่วนในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินนอกจากที่ความทึบน้ำในคอนกรีตจะขึ้นกับ W/B แล้ว ยังขึ้นกับลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าถ่านหินด้วย (Neville, 1996 ; Chindaprasirt *et al.*, 2005 ; Chalee *et al.*, 2009 ; Sata *et al.*, 2012) โดยเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงและมีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วย ซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ในปริมาณสูงจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลให้เกิดความทึบน้ำและสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น (Chalee *et al.*, 2009 ; Sata *et al.*, 2012) ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน W/B ไม่ได้เป็นปัจจัยหลักเพียงอย่างเดียวที่ส่งผลให้คอนกรีตสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ โดยผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ

ประสานจะให้ผลชัดเจนต่อการป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน นอกจากนี้ พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตมากขึ้น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานก็มีผลต่อการต้านทานคลอไรด์ลดลง โดยสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอไรด์จากที่  $W/B = 0.55$  เป็น  $0.45$  เช่น คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานที่อายุ 35 และ 90 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลงจาก  $0.55$  เป็น  $0.45$  ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 25 มม. ลดลงเท่ากับ 0.16, 0.08, 0.01, 0.02 และ 0 ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวนี้สอดคล้องกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แจ้งในสิ่งแวดล้อมทะเล (Chalee et al., 2009)

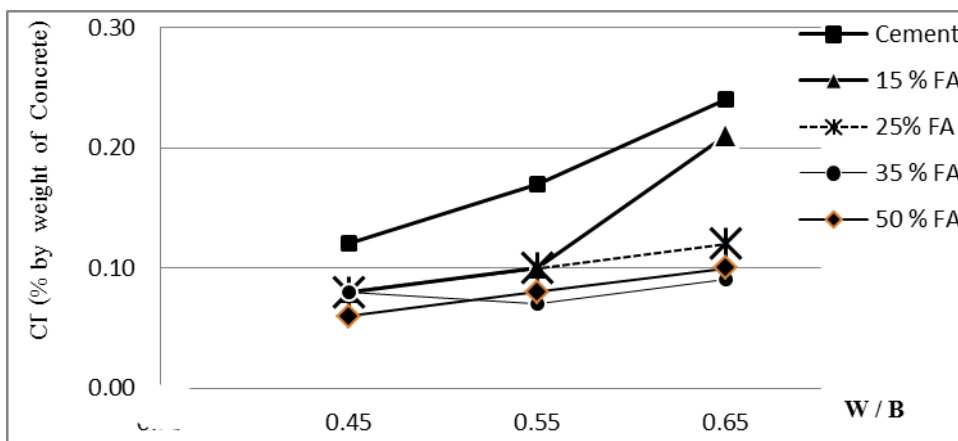
เมื่อพิจารณาผลของ  $W/B$  ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ที่อายุ 90 วัน ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน (ดังรูปที่ 4.6) พบว่าผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการแทรกซึมของคลอไรด์ ที่อายุ 35 วัน ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่า ยิ่งปฏิกิริยาปอซโซลานมีความชัดเจนมากขึ้น (อายุคอนกรีตนานขึ้น) การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะให้ผลต่อการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินน้อยลง สังเกตได้ชัดเจนจากการเปลี่ยนแปลง  $W/B$  ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 25 มม. และ 35 มม. ดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ตามลำดับ



(ก) ความลึก 15 มม.

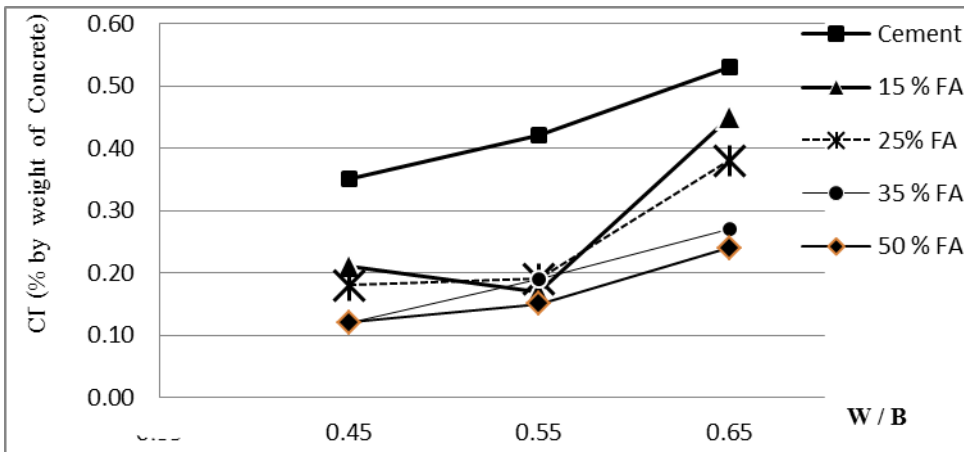


(ข) ความลึก 25 มม.

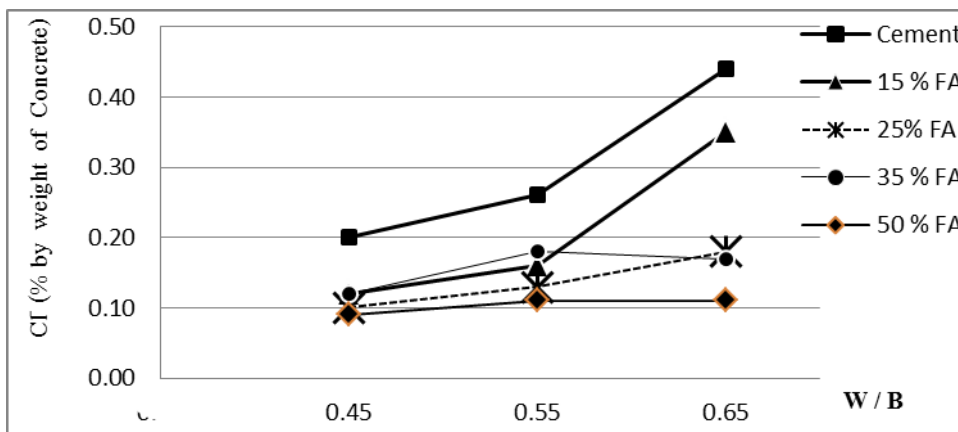


(ค) ความลึก 35 มม.

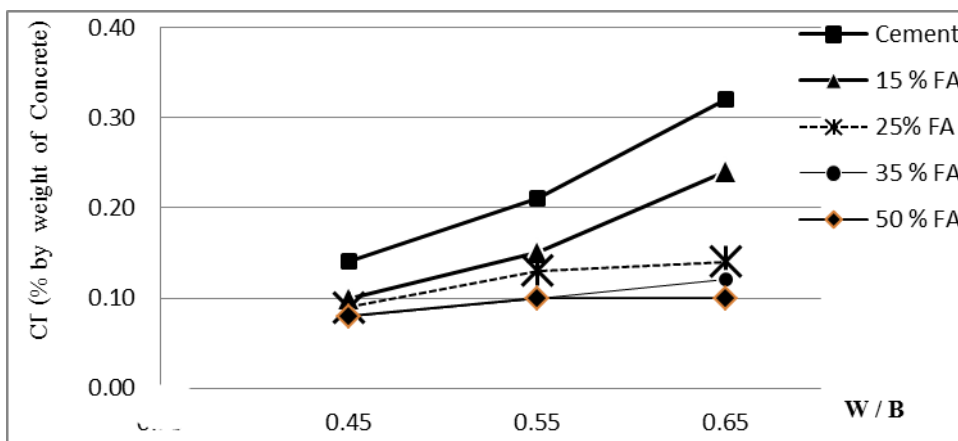
รูปที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test เป็นเวลา 35 วัน



(ก) ความลึก 15 มม.



(ข) ความลึก 25 มม.



(ค) ความลึก 35 มม.

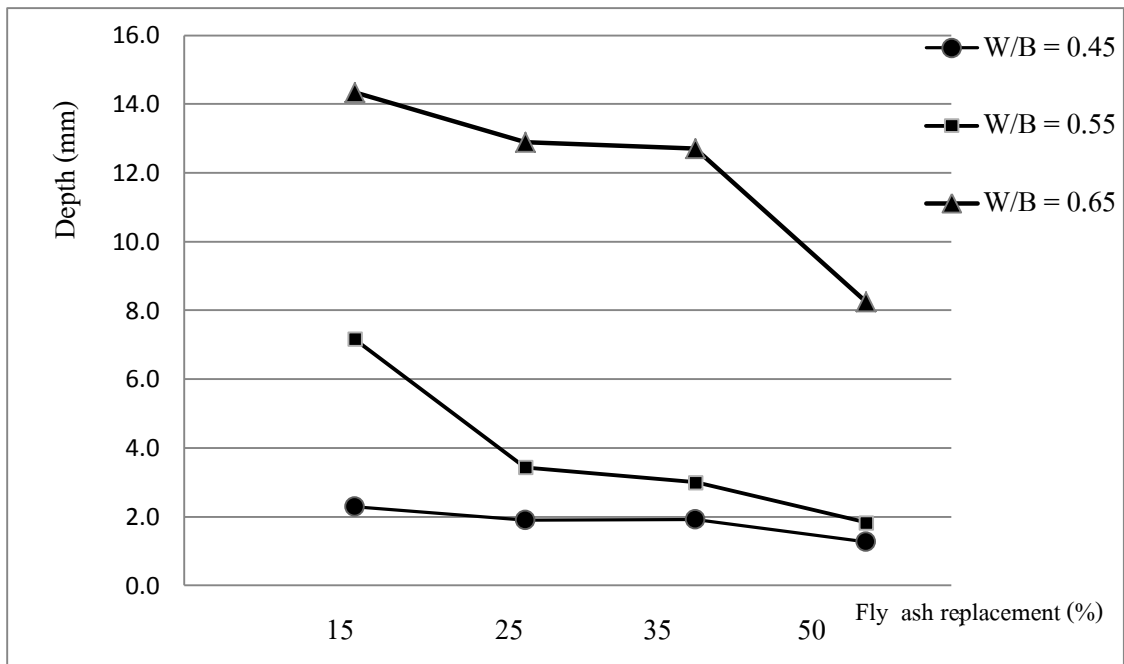
รูปที่ 4.6 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี

Bulk diffusion test เป็นเวลา 90 วัน

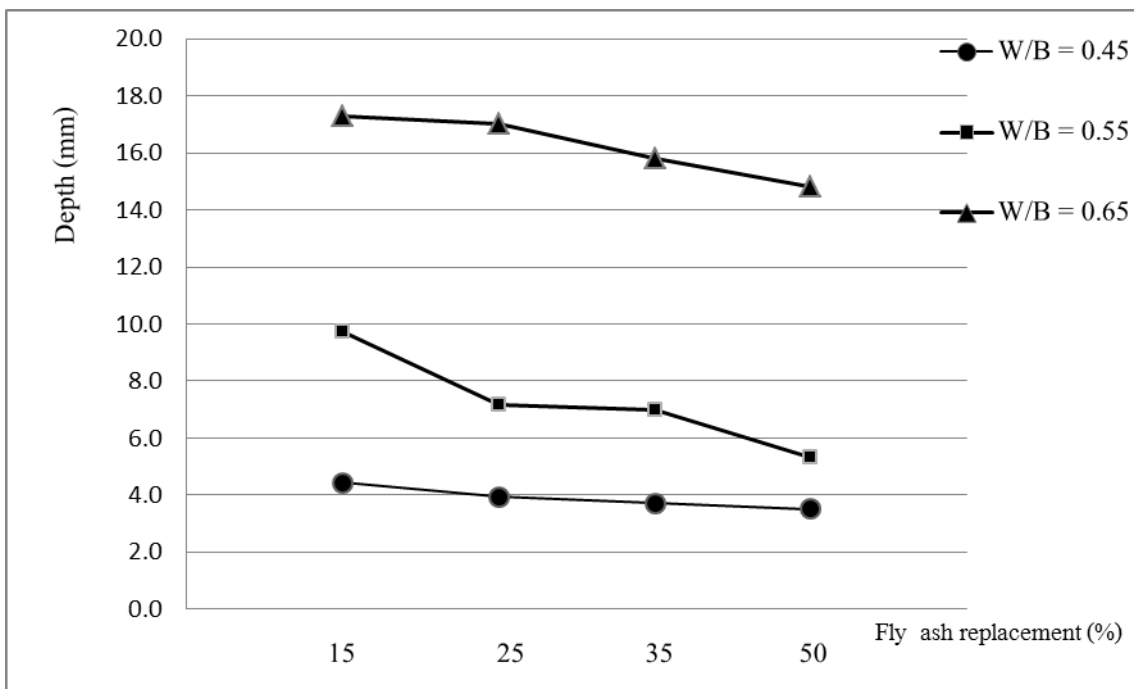
#### 4.4 ความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion

เมื่อพิจารณาผลความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ที่ได้จาก Colorimetric technique ที่อายุ 35 และ 90 วัน จากรูปที่ 4.7 (ก) และ 4.7 (ข) ตามลำดับ พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการลดลงของความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตค่อนข้างชัดเจน อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้านหินในปริมาณมากขึ้นมีแนวโน้มให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ลดลงเช่น คอนกรีตใช้ W/B = 0.45 และแทนที่เถ้านหินในคอนกรีตร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test เท่ากับ 2.3, 1.9, 1.9 และ 1.3 มม. ตามลำดับ ซึ่งการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ส่งผลต่อการลดความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้เถ้านหินปริมาณต่ำมากกว่าปริมาณสูง เช่น ที่อายุคอนกรีต 35 วัน การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลงจาก 0.65 เป็น 0.45 ในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานส่งผลให้ความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าลดลงเท่ากับ 12.0, 11.0, 10.8, 10.5 และ 7.0 มม.ตามลำดับ.

เมื่อพิจารณาที่อายุคอนกรีต 90 วัน พบว่า ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินมีแนวโน้มเหมือนกับที่อายุ 35 วัน และเป็นที่น่าสนใจว่า การใช้เถ้านหินผสมในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้น มีประสิทธิภาพในการลดความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion มากกว่าในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ซึ่งผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (กิตติกร เจริญพร้อม และวิเชียร ชาลี, 2554)



(ก) แซ่คลอไรต์ อายุ 35 วัน



(ข) แซ่คลอไรต์ อายุ 90 วัน

รูปที่ 4.7 ความลึกของการแทรกซึมของคลอไรต์ที่ทดสอบ โดยวิธี Bulk diffusion test

#### 4.5 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion

ในการศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ( $D_{CB}$ ) โดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ที่อายุ 35 และ 90 วัน ดังแสดงในสมการที่ (4.1) (Crank, 1975)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{CB} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (4.1)$$

เมื่อค่า  $D_{CB}$  ในสมการที่ (4.1) เป็นค่าคงที่ คำตอบทั่วไปของสมการที่ (4.1) แสดงดังสมการที่ (4.2)

$$C_{x,t} = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{CB}t}} \right) \right] \quad (4.2)$$

เมื่อ  $D_{x,t}$  = ปริมาณคลอไรด์ (โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) ที่ระดับความลึก  $x$  และระยะเวลาในการแช่  $t$

$x$  = ระยะจากหน้าผิวคอนกรีต (มม.)

$t$  = ระยะเวลาที่แช่ (วินาที)

$C_0$  = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (ที่  $x = 0$ ) ที่ระยะเวลาแช่  $t$

$D_{CB}$  = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ที่ระยะเวลาแช่  $t$  (มม<sup>2</sup>/วินาที)

$\operatorname{erf}$  = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error function)

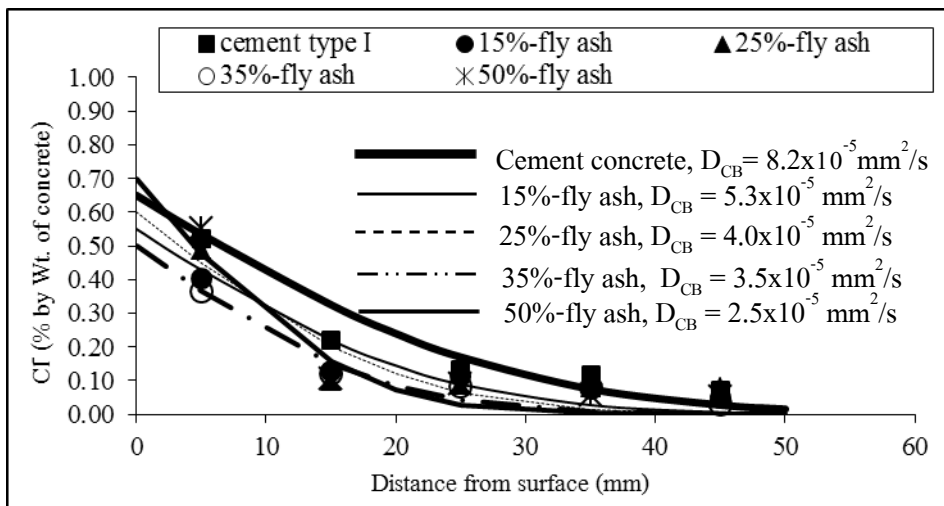
การปรับค่า  $D_{CB}$  และ  $C_0$  ในสมการที่ (4.2) เพื่อให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ส่วนผสมต่างๆ มากที่สุด ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ที่แสดงการหาค่า  $D_{CB}$  และ  $C_0$  โดยใช้สมการที่ (4.2) ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินและที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ที่อายุ 35 และ 90 วันตามลำดับ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี หาได้ในลักษณะเดียวกันโดยแทนค่า  $D_{CB}$  ด้วย  $D_C$  และปรับค่า  $D_C$  ในสมการที่ (4.2) ให้กราฟ



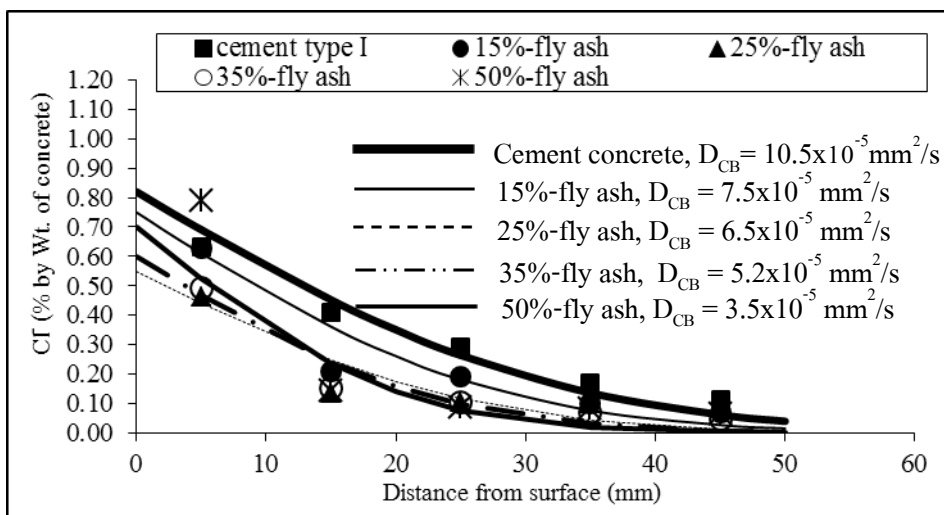
สอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล โดยตารางที่ 4.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ( $D_{CB}$ ) ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion เป็นเวลา 35 วัน และ 90 วัน

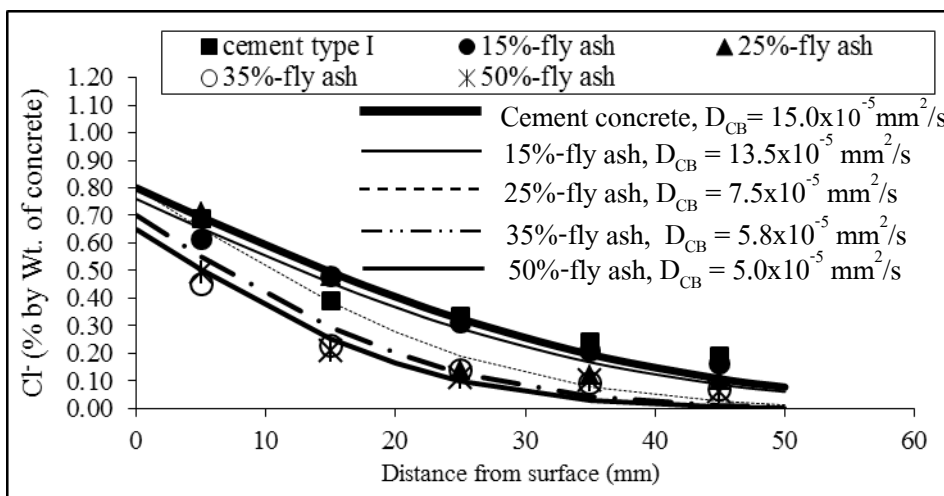
ส่วนผสม	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ $D_{CB} \times 10^{-6}$ (มม <sup>2</sup> /วินาที)	
	35 วัน	90 วัน
I45	82.00	110.00
I45FA15	53.00	66.00
I45FA25	40.00	55.00
I45FA35	35.00	45.00
I45FA50	25.00	38.00
I55	105.00	130.00
I55FA15	75.00	79.00
I55FA25	65.00	68.00
I55FA35	52.00	56.00
I55FA50	35.00	40.00
I65	150.00	189.00
I65FA15	135.00	135.00
I65FA25	75.00	85.00
I65FA35	58.00	65.00
I65FA50	50.00	55.00



(f) W/B = 0.45

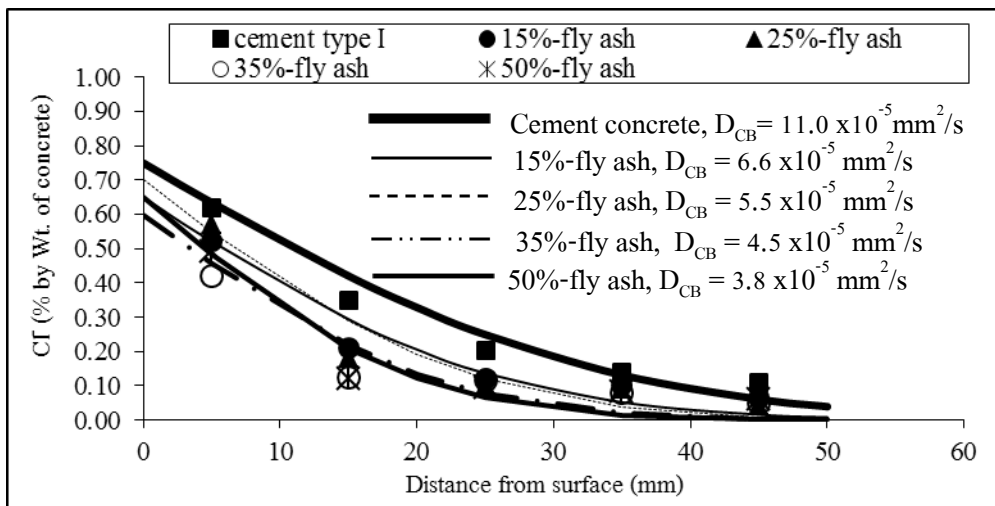


(g) W/B = 0.55

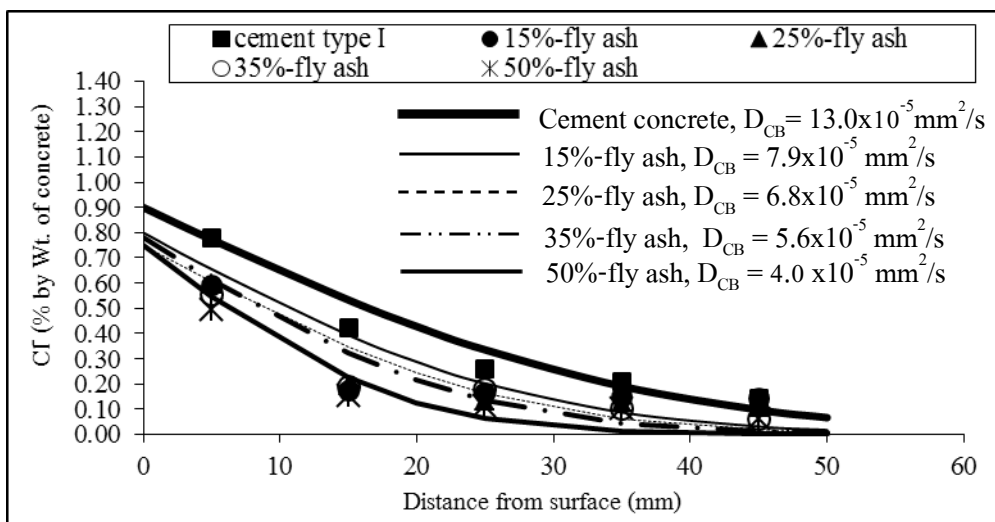


(h) W/B = 0.65

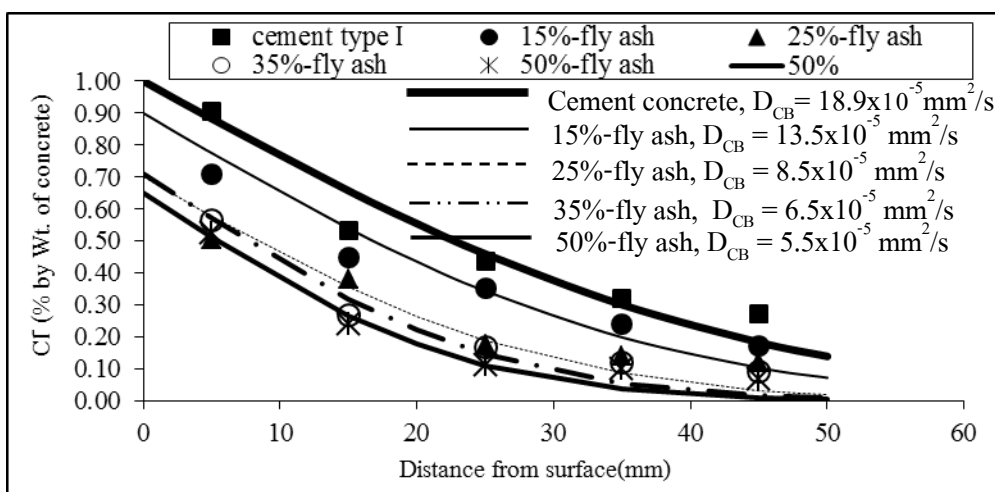
รูปที่ 4.8 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test เป็นเวลา 35 วัน



(n) W/B = 0.45



(ข) W/B = 0.55



(ค) W/B = 0.65

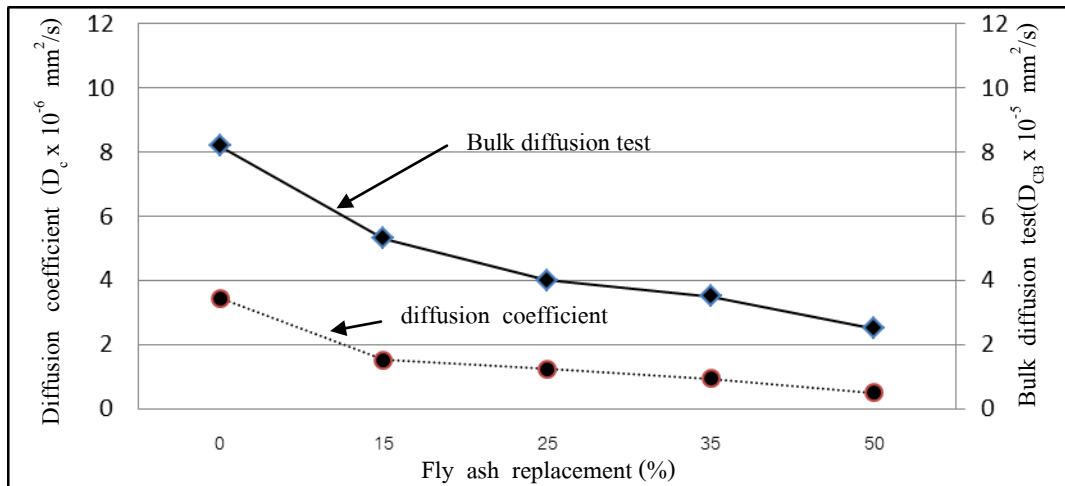
รูปที่ 4.9 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test เป็นเวลา 90 วัน

#### 4.6 ผลของเถ้านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion และที่แช่น้ำทะเล 12 ปี

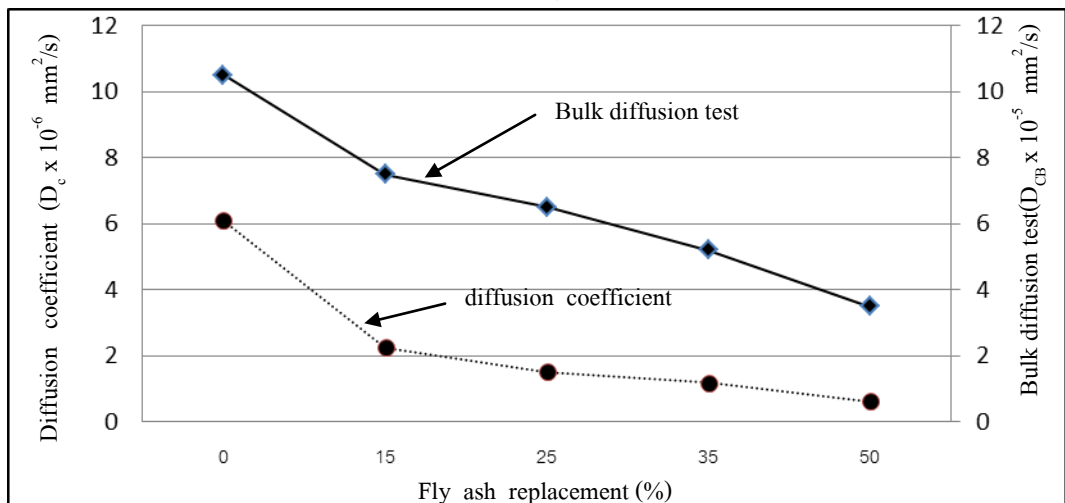
เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ( $D_{CB}$ ) ที่อายุ 35 และ 90 วันในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 , 0.55 และ 0.65 ที่อายุ 35 และ 90 วัน เทียบกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี ( $D_C$ ) ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ พบว่า การใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน จากผลการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธี Bulk diffusion test ที่อายุ 35 วัน และ 90 วัน พบว่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตมีทิศทางเดียวกันกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสภาพแวดล้อมทะเล 12 ปี ซึ่งแสดงถึงผลของปฏิกิริยาปอซโซลานของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินต่อสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตและให้ผลดีเมื่ออายุเพิ่มขึ้น (ที่บ่มน้ำมากขึ้นสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ต่ำลง) ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินในปริมาณที่สูงขึ้น ปฏิกิริยาปอซโซลานในระยะยาวมีผลทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นและลดอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปีได้ (Chindaprasirt et al., 2005 ; Chalee et al., 2009) การผสมเถ้านหินสามารถลดอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตได้อย่างชัดเจน โดยการแทนที่เถ้านหินในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้  $D_{CB}$  และ  $D_C$  มีค่าลดลงเป็นแนวโน้มในทางเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (ระยะสั้น) และผลทดสอบในภาคสนามที่เป็นสิ่งแวดล้อมจริง (ระยะยาว) มีผลทดสอบที่สอดคล้องกันโดยจะเห็นได้ว่า  $D_{CB}$  มีแนวโน้มเดียวกับ  $D_C$  แต่มีค่าสูงกว่าค่อนข้างมาก เนื่องจากสารละลายคลอไรด์ที่ใช้แช่ตัวอย่างคอนกรีต โดยวิธี Bulk diffusion test มีความเข้มข้นสูงถึง 2.8 โมลาร์ และสูงกว่าความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเลที่แช่ตัวอย่างทดสอบในภาคสนามที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ประมาณ 0.50 โมลาร์ (Chalee et al., 2010) จึงส่งผลให้อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ที่วัดในรูปแบบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์สูงกว่ากลุ่มที่แช่ในน้ำทะเลอย่างชัดเจน โดยการทดสอบวิธี Bulk diffusion test กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ สามารถเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ในระยะยาวภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล จากผลทดสอบ Bulk diffusion ที่อายุ 35 และ 90 วันได้

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ ที่ได้จากการฉีดสีลเวอร้ในเตรต (Colorimetric technique) กับความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตกลุ่มเดียวกับที่แช่ในน้ำ

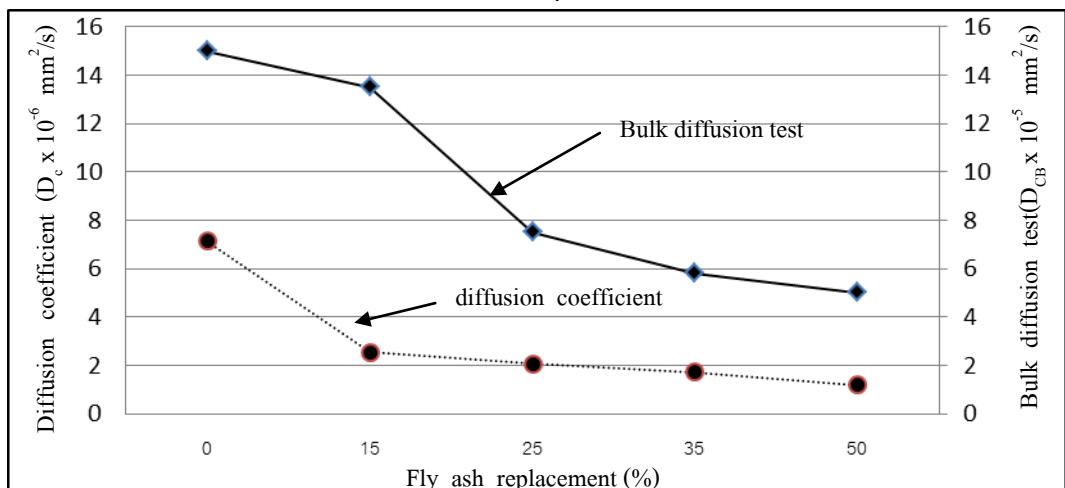
ทะเล 12 ปี ดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับพบว่า ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตทั้งสองกลุ่มมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่อแทนที่เสาถ้ำหินในปริมาณที่มากขึ้นสามารถลดความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ลงได้ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถใช้ประเมินความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ระยะยาวที่เสาน้ำทะเลจากการทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion ได้



ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45

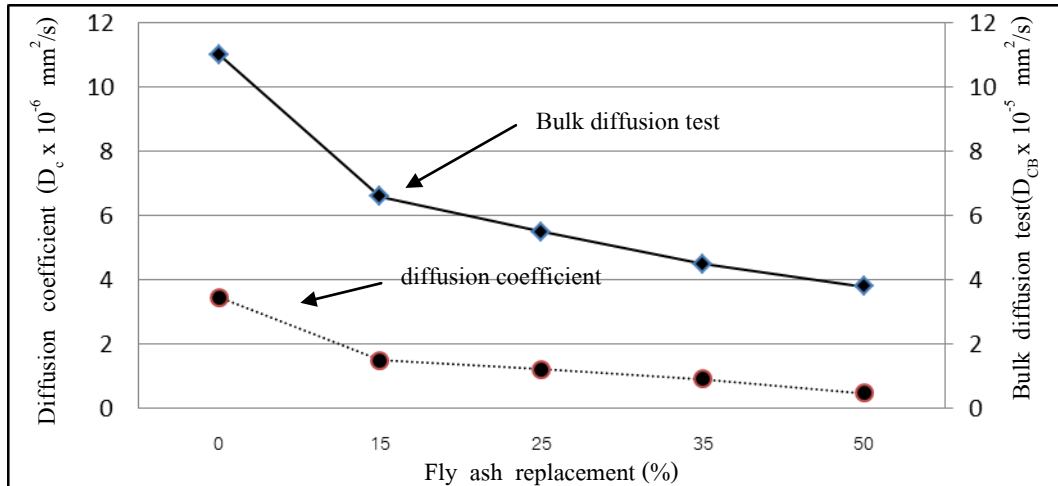


ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55

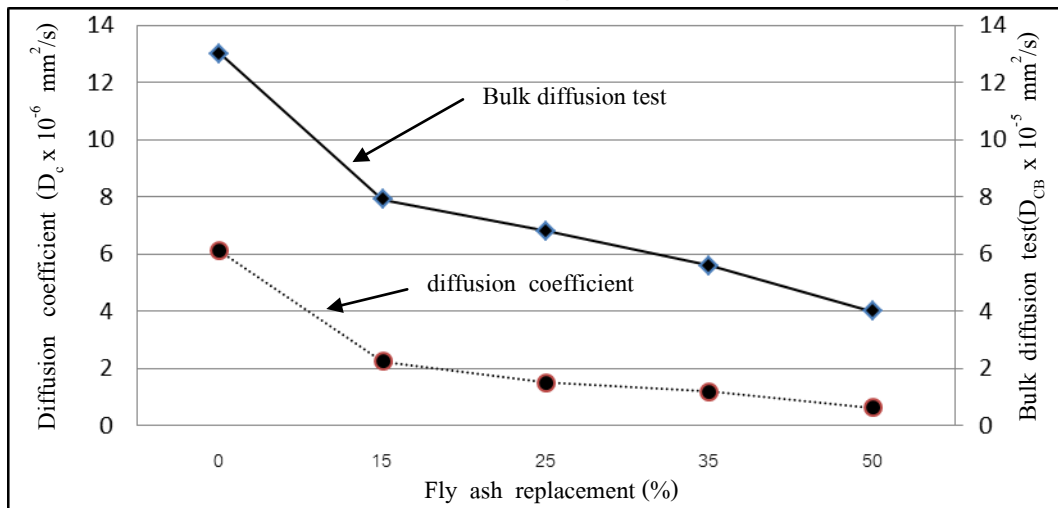


ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.65

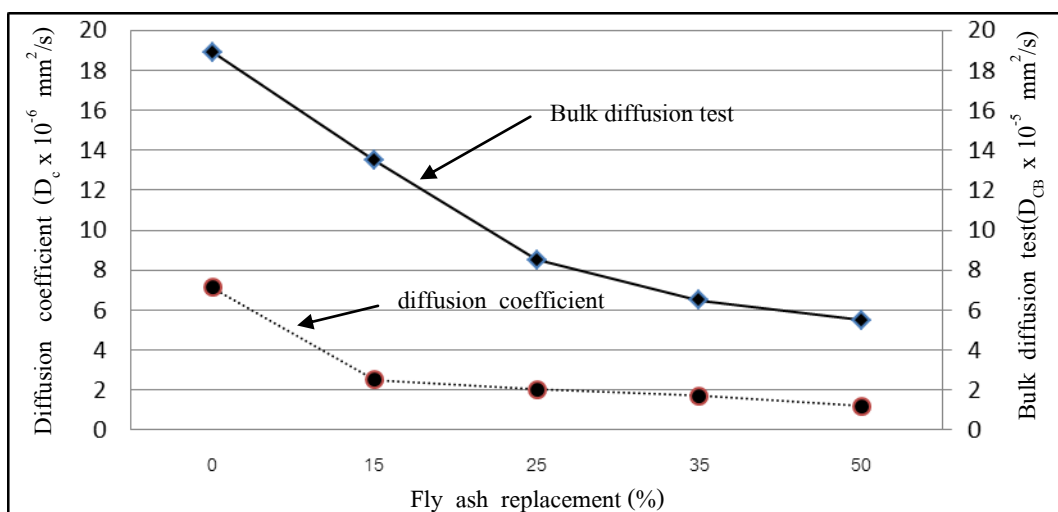
รูปที่ 4.10 ผลของเถ้านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ( $D_{CB}$ ) ในคอนกรีตที่อายุ 35 วัน กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี ( $D_C$ )



ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45

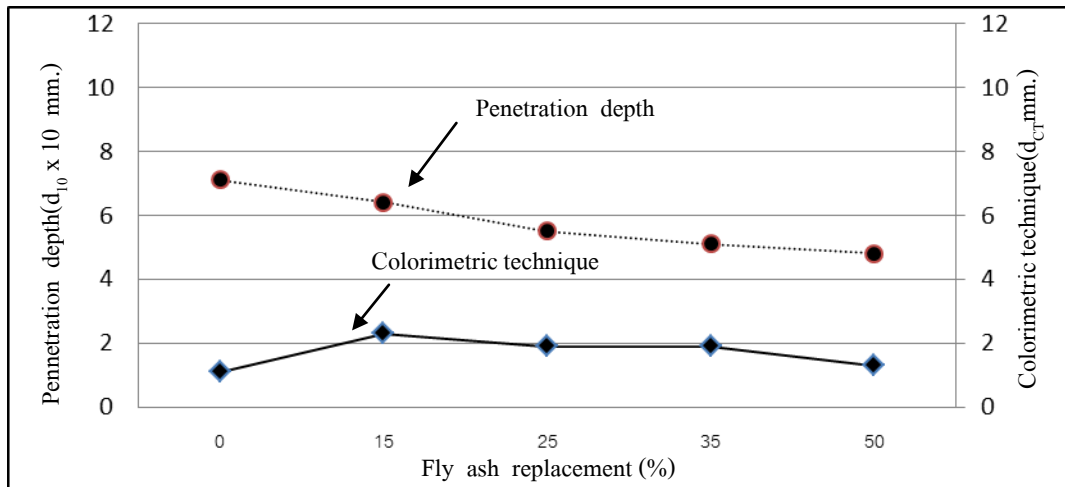


ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55

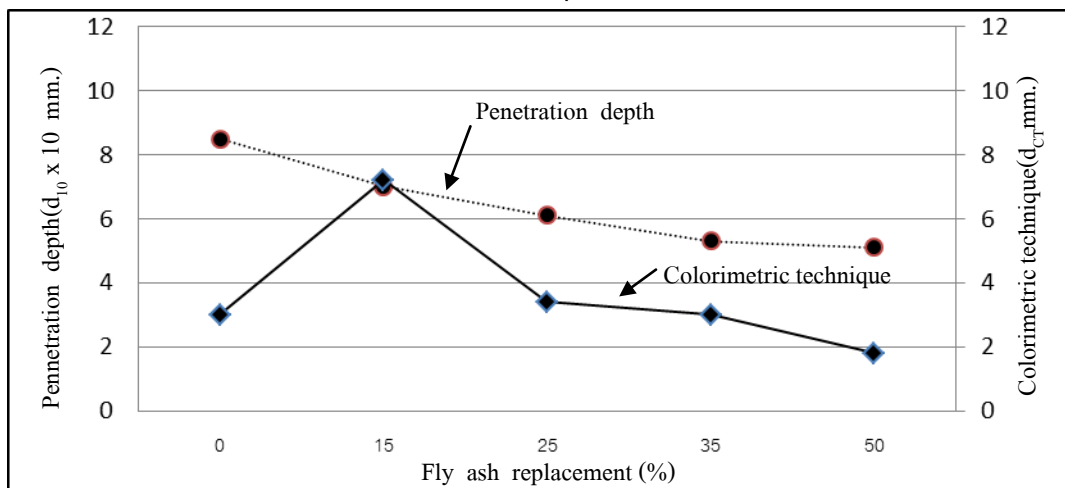


ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.65

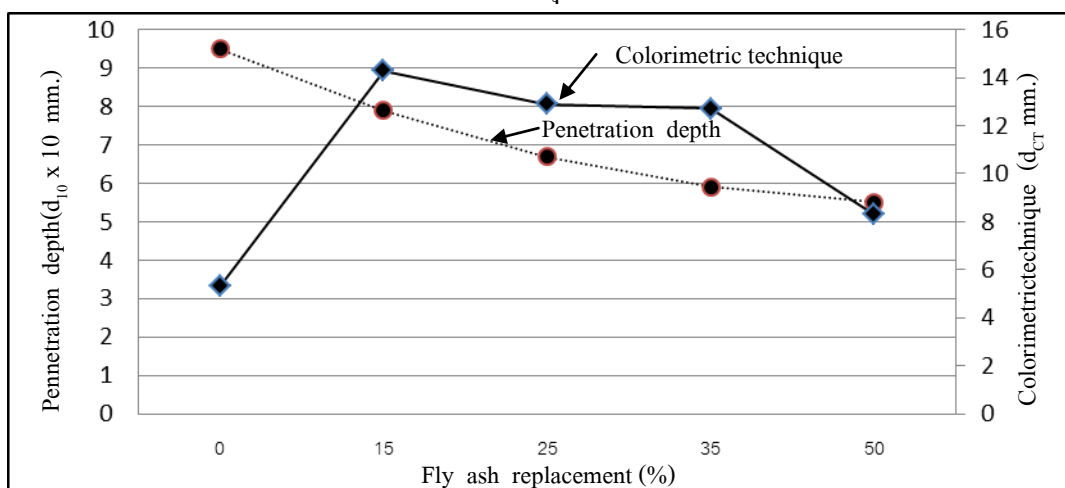
รูปที่ 4.11 ผลของเถ้านหินผลต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ( $D_{CB}$ ) ในคอนกรีตที่อายุ 90 วัน กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี ( $D_C$ )



ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45



ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55

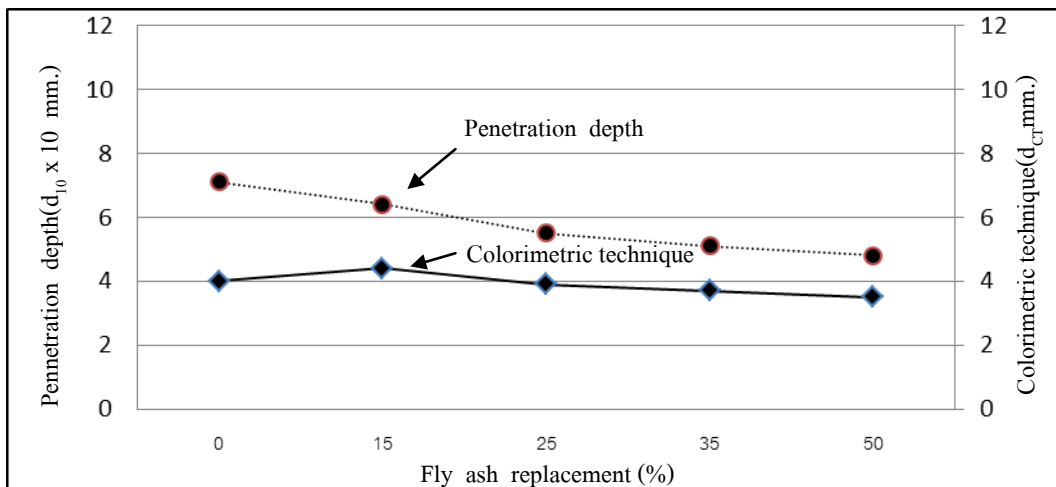


ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.65

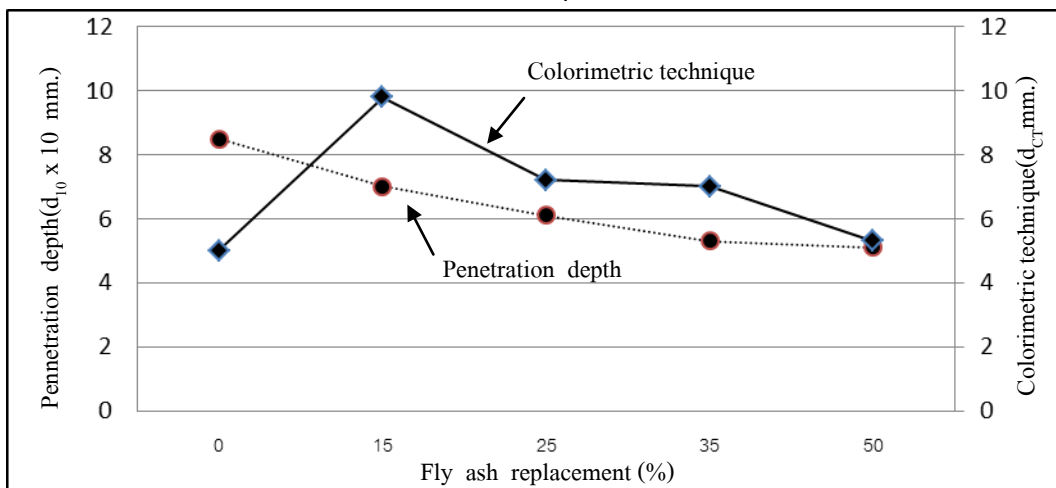
รูปที่ 4.12 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี

Colorimetric technique ( $d_{CB}$ ) ในคอนกรีตที่อายุ 35 วัน กับความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี ( $d_{12}$ )

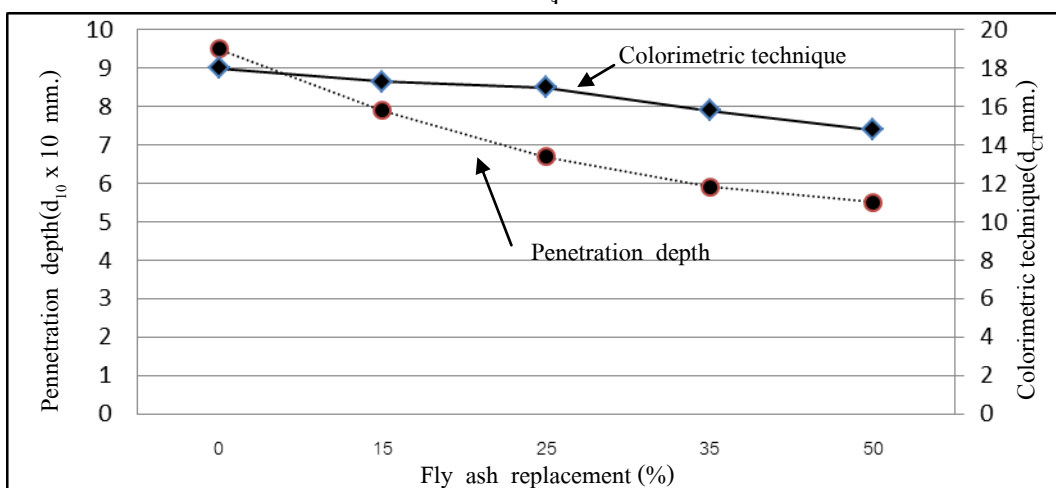




ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45



ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55



ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.65

รูปที่ 4.13 ผลของเถ้านหินต่อความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี

Colorimetric technique ( $d_{CB}$ ) ในคอนกรีตที่อายุ 90 วัน กับความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี ( $d_{12}$ )

#### 4.7 การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตระยะยาวจากผลทดสอบ Bulk diffusion

การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี จากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ซึ่งสามารถประเมินคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตในระยะยาวจากผลการทดสอบระยะสั้น ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ที่อายุคอนกรีต 35 และ 90 วัน ดังรูปที่ 4.14 ก) และดังรูปที่ 4.14 ข) ตามลำดับ โดยใช้หลักการวิเคราะห์เชิงถดถอย (Regression analysis) ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ( $D_{CB}$ ) ในคอนกรีตที่อายุ 35 วันกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี ( $D_C$ ) ดังสมการที่ (4.3) ถึง (4.7)

$$D_C = 0.496D_{CB} - 0.021 \quad (\text{คอนกรีตธรรมดา}) \quad (4.3)$$

$$D_C = 0.108 D_{CB} + 1.150 \quad (\text{คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15}) \quad (4.4)$$

$$D_C = 0.321 D_{CB} - 0.173 \quad (\text{คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 25}) \quad (4.5)$$

$$D_C = 0.298 D_{CB} - 0.165 \quad (\text{คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 35}) \quad (4.6)$$

$$D_C = 0.287 D_{CB} - 0.284 \quad (\text{คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50}) \quad (4.7)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ( $D_{CB}$ ) ในคอนกรีตที่อายุ 90 วันกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี ( $D_C$ ) ดังสมการที่ (4.8) ถึง (4.12)

$$D_C = 0.398 D_{CB} - 0.138 \quad (\text{คอนกรีตธรรมดา}) \quad (4.8)$$

$$D_C = 0.119 D_{CB} + 0.989 \quad (\text{คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15}) \quad (4.9)$$

$$D_C = 0.442 D_{CB} - 1.305 \quad (\text{คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 25}) \quad (4.10)$$

$$D_C = 0.394 D_{CB} - 0.873 \quad (\text{คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 35}) \quad (4.11)$$

$$D_C = 0.397 D_{CB} - 0.991 \quad (\text{คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50}) \quad (4.12)$$

เมื่อ  $D_C$  = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี ( $\times 10^{-6}$  มม<sup>2</sup>/ วินาที)

$D_{CB}$  = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ( $\times 10^{-5}$  มม<sup>2</sup>/ วินาที)

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ในคอนกรีตที่อายุ 35 และ 90 วัน ดังที่แสดงข้างต้น ได้จากการวิเคราะห์เชิงถดถอย (Regression analysis) จากสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ซึ่งความสัมพันธ์นี้สามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้น ในการประเมินคุณสมบัติความคงทนของคอนกรีตในระยะยาว จากผลการทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ที่อายุ 35 และ 90 วัน ได้

นอกจากนี้สามารถประเมินความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อายุ 12 ปี จากผลทดสอบ Bulk diffusion test ที่อายุ 35 และ 90 วัน ดังรูปที่ 4.15 (ก).และดังรูปที่ 4.15 (ข). ตามลำดับ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบ โดยวิธี Colorimetric technique ( $d_{CB}$ ) ในคอนกรีตที่อายุ 35 วันกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี ( $d_{12}$ ) ดังสมการที่ (4.13) ถึง (4.17)

$$d_{12} = 0.566d_{CB} + 6.591 \quad (\text{คอนกรีตธรรมดา}) \quad (4.13)$$

$$d_{12} = 0.125d_{CB} + 6.107 \quad (\text{คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15}) \quad (4.14)$$

$$d_{12} = 0.092d_{CB} + 5.537 \quad (\text{คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 25}) \quad (4.15)$$

$$d_{12} = 0.069d_{CB} + 5.027 \quad (\text{คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 35}) \quad (4.16)$$

$$d_{12} = 0.083d_{CB} + 4.815 \quad (\text{คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50}) \quad (4.17)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Colorimetric technique ( $d_{CB}$ ) ในคอนกรีตที่อายุ 90 วันกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี ( $d_{12}$ ) ดังสมการที่ (4.18) ถึง (4.22)

$$d_{12} = 0.131d_{CB} + 7.186 \quad (\text{คอนกรีตธรรมดา}) \quad (4.18)$$

$$d_{12} = 0.116d_{CB} + 5.876 \quad (\text{คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15}) \quad (4.19)$$

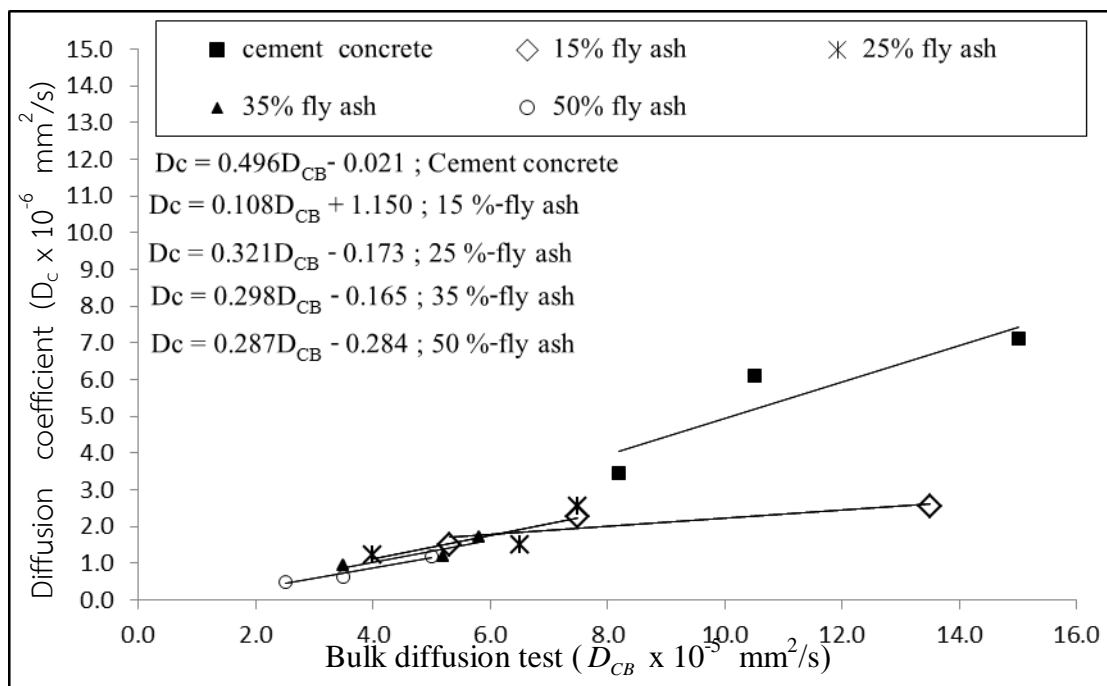
$$d_{12} = 0.084d_{CB} + 5.307 \quad (\text{คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 25}) \quad (4.20)$$

$$d_{12} = 0.066d_{CB} + 4.845 \quad (\text{คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 35}) \quad (4.21)$$

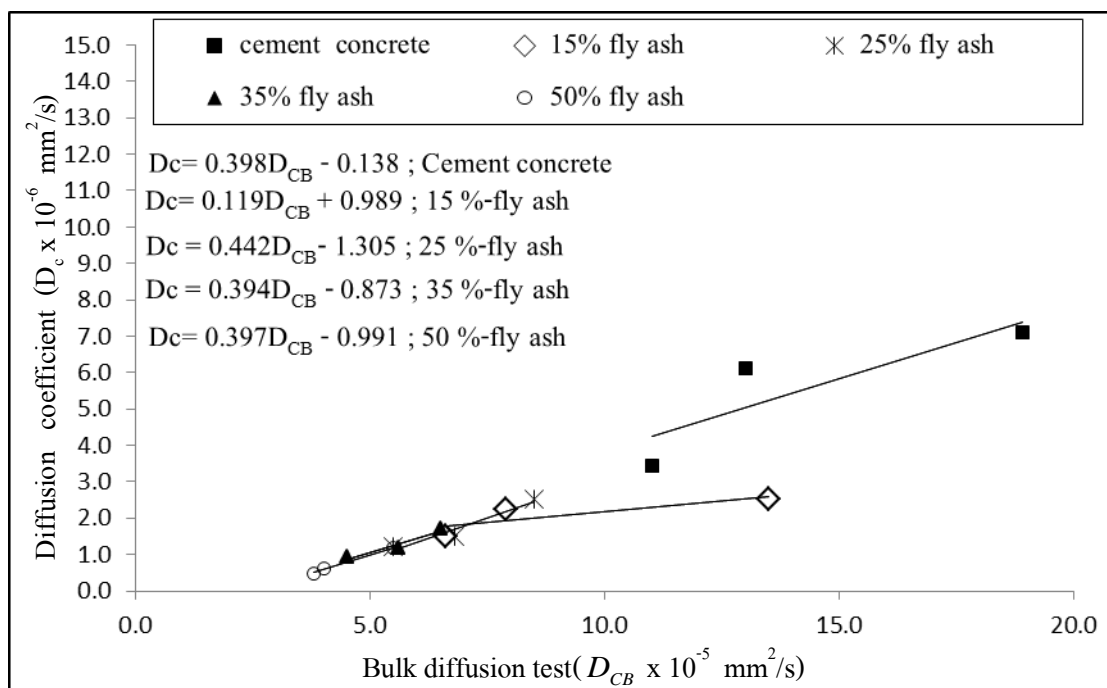
$$d_{12} = 0.055d_{CB} + 4.697 \quad (\text{คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50}) \quad (4.22)$$

เมื่อ  $d_{12}$  = ความลึกการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี (x10 มม.)

$d_{CB}$  = ความลึกการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Colorimetric technique ( มม. )

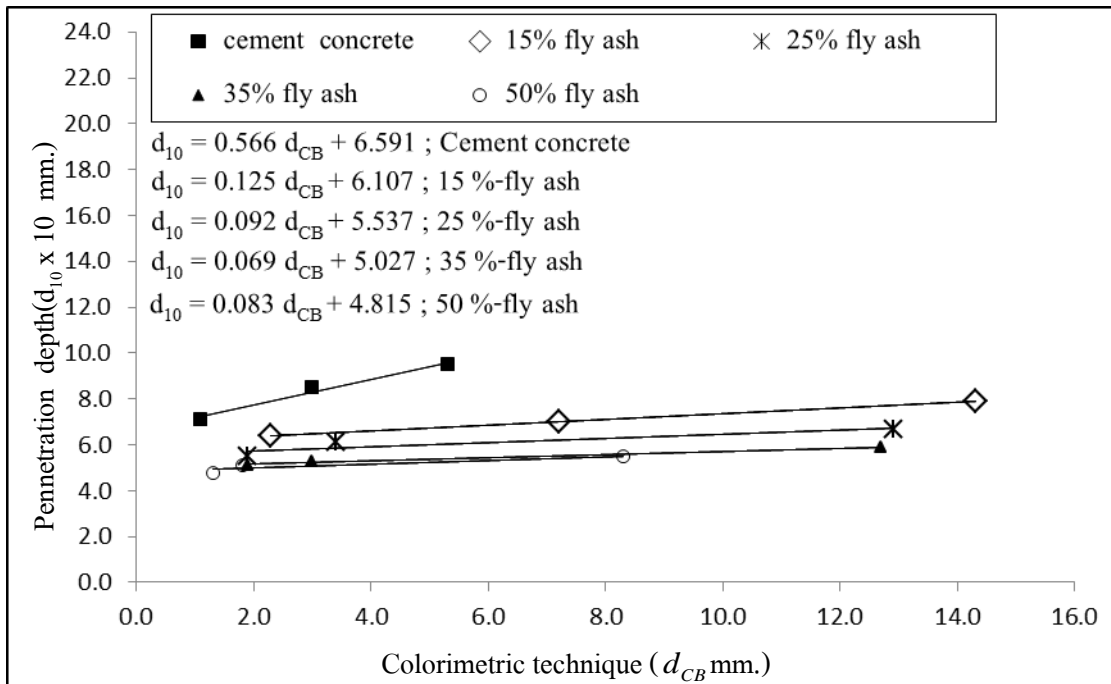


ก) อายุคอนกรีต 35 วัน

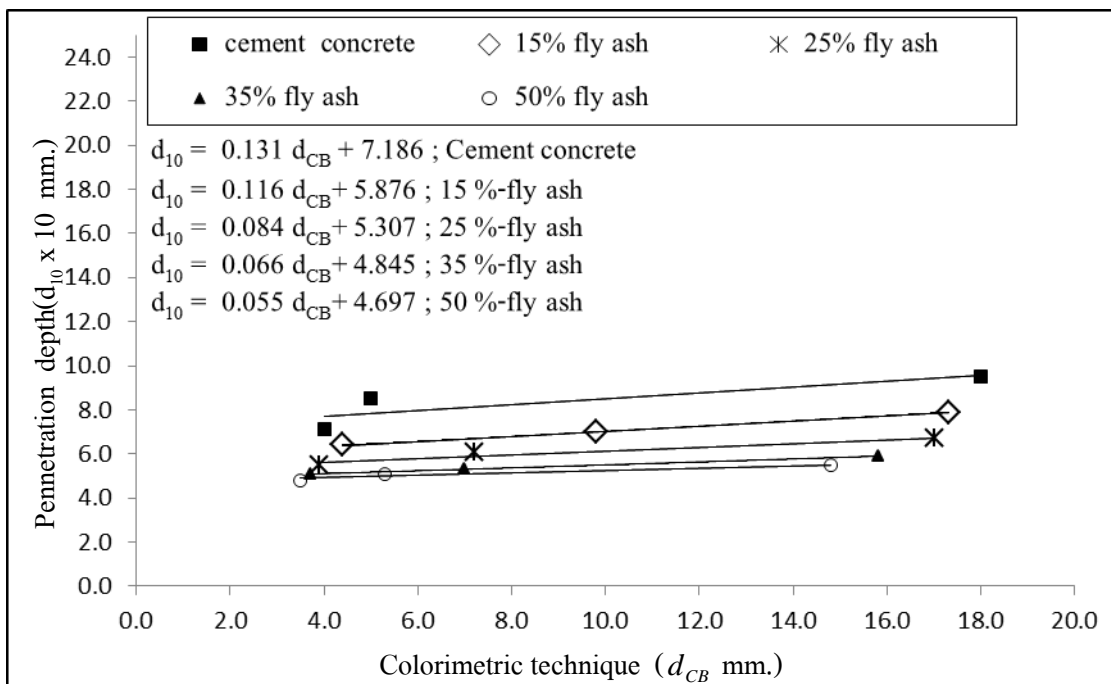


ข) อายุคอนกรีต 90 วัน

รูปที่ 4.14. ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี  $D_c$  กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test  $D_{CB}$  ที่อายุ 35 และ 90 วัน



ก) อายุคอนกรีต 35 วัน



ข) อายุคอนกรีต 90 วัน

รูปที่ 4.15. ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี ( $d_{12}$ ) กับความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Colorimetric technique ( $d_{CB}$ ) ที่อายุ 35 และ 90 วัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

จากผลการศึกษาของงานวิจัยนี้สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การใช้เถาถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion ที่อายุ 35 และอายุ 90 วัน มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน

5.1.2 คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง โดยในคอนกรีตธรรมดาจะเห็นผลได้ชัดเจนมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหิน

5.1.3 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน การใช้เถาถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion ที่อายุ 35 และ 90 วัน มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่คอนกรีตในน้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี

5.1.4 ข้อมูลจากการศึกษาครั้งนี้สามารถประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหินร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานหลังจากแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี จากผลการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion ที่อายุ 35 และอายุ 90 วัน ได้

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1. ควรมีการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการทดลองระยะสั้นกับคอนกรีตที่ผสมวัสดุพอซโซลานชนิดอื่นที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลานาน เช่น เถ้าแกลบเปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน ที่มีในประเทศ เพื่อจะได้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ต้องการใช้งานในสภาวะแวดล้อมทะเล ให้มีความคงทนต่อไป

5.2.1. ควรมีการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองระยะสั้น โดยวิธีทดสอบแบบไม่ทำลาย กับ ผลทดสอบความคงทนของคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล

## เอกสารอ้างอิง

- กิตติกร เจริญพร้อม และ วิเชียร ชาลี. (2554). ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 21(3), หน้า 522-531.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต. ครั้งที่ 3, สมาคมคอนกรีตไทย
- วิเชียร ชาลี และ ชีรพงศ์ เชื้อพลบ. ( 2556). การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก. *วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, 36(2), หน้า 197-213.
- วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2551). ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีเร่งกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต. *การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลีเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2*, 5-6 กันยายน 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 66-72.
- ASTM C1556.(2008). Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.02.*
- 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



- Chalee, W., & 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Crank, J., (1975). *The Mathematics of Diffusion*, 2<sup>nd</sup>, ed., Oxford Press, London.
- Dimitri Val, V., & Mark Stewart, G., (2003). Life Cycle Cost Analysis of Reinforced Concrete Structure in Marine Environments. *Structural Safety*, 25, 343-362.
- Kaushik, S. K. and Islam, S., 1995 "Suitability Of Sea Water for Mixing Structural Concrete Exposed to a Marine Environment," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 17, pp. 177-185.
- Neville, A.M., (1996). *Properties of Concrete*, 4<sup>th</sup> ed., England, Addison Wesley
- Sata, V., Tangpagasit, J., Jaturapitakkul, C. & Chindapasirt, P., (2012). Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix. *Cement and Concrete Composites*, 34, 94 -100.
- 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)

#### บทความวิจัยที่ส่งตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

- 1) ปุณยวีร์ นิลรัตน์, วัฒนา พุทธิธาทา และวิเชียร ชาลี “การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test”, *Burapha Sci* (Submitted paper)

1 การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจาก  
 2 ผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test  
 3 Evaluation of long term chloride penetration in concrete under marine environment by  
 4 Bulk diffusion test method

5  
 6 ปุณยวีร์ นิลรัตน์<sup>1</sup> วัฒนา พุทธิพา<sup>1</sup> และวิเชียร ชาลี<sup>1\*</sup>

7 Punyavee Ninrat<sup>1</sup>, Wattana Puttota<sup>1</sup> and Wichian Chalee<sup>1\*</sup>

8 <sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

9 <sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

10  
 11 **บทคัดย่อ**

12 งานวิจัยนี้ศึกษาการประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล จากผลทดสอบ  
 13 โดยวิธี Bulk diffusion test โดยใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะใน  
 14 อัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 0.55 และ 0.65  
 15 (ส่วนผสมเดียวกับคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี) หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าน  
 16 ศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธี Bulk diffusion test ที่อายุ 35 วัน นอกจากนั้น  
 17 ได้เก็บตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี มาทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ผล  
 18 การศึกษาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอ  
 19 ไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test มีแนวโน้มลดลง และเป็นไปในทิศทางเดียวกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์  
 20 ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี นอกจากนั้น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ส่งผลให้  
 21 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาที่มีค่าลดลงมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน การศึกษาครั้งนี้ สามารถประเมิน  
 22 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลระยะยาว จากผลการทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ได้

23  
 24 **คำสำคัญ** : การแทรกซึมคลอไรด์ / สิ่งแวดล้อมทะเล / วิธี Bulk diffusion test / เถ้าถ่านหิน

25  
 26 **Abstract**

27 This research aimed to evaluate the long term chloride penetration of concrete under marine environment  
 28 from the Bulk diffusion test method. Fly ash concretes were cast by using fly ash from Mea Moh power plant to  
 29 partially replace Portland cement type I at percentages of 0, 15, 25, 35 and 50 by weight of binder. Water to  
 30 binder ratios (W/B) were varied at 0.45, 0.55, and 0.65. (the same mix proportions of concrete exposed to marine  
 31 site for 12 years). The cylindrical specimen with 100-mm in diameter and 200-mm in height were cast for Bulk  
 32 diffusion test at 35 days of curing. In addition, water soluble chlorides in the concrete were measured after the  
 33 concrete was exposed to the tidal zone for 12 years. The results show that the chloride penetration of concrete

34 from Bulk diffusion test decrease with the increase of fly ash replacement of Portland cement type I, which is the  
 35 same trend of chloride diffusion coefficient of 12-year exposure in marine site. In addition, when the W/B ratio of  
 36 concrete was reduced, the decrease of chloride penetration in normal concrete was higher than that of the fly ash  
 37 concrete. The results of bulk diffusion test in this study can be used to evaluate the chloride penetration of fly ash  
 38 concrete under long term exposure in marine environment.

39

40 **Key words :** chloride penetration / marine environment / Bulk diffusion test method / fly ash

41 \*Corresponding author. E-mail: wichian@buu.ac.th

42

### 43 บทนำ

44 โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้งานในสภาพแวดล้อมทะเล มีการกัดกร่อนที่ก่อให้เกิดความเสียหายกับ  
 45 โครงสร้างได้เร็วกว่าโครงสร้างปกติ โดยการทำลายส่วนใหญ่เกิดจากเกลือคลอไรด์ที่เร่งให้สนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต  
 46 เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และต้นคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าวเสียหาย ตลอดจนการรับแรงเชิงกลของเหล็กเสริมและ  
 47 คอนกรีตลดลงอย่างชัดเจน (Neville, 1996 ; Dimitri Val *et al.*, 2003 ; Chalee *et al.*, 2010 ; Cheewaket *et al.*, 2012)  
 48 โดยทั่วไปสารประกอบคลอไรด์จะไม่ส่งผลที่เป็นอันตรายกับเนื้อของคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริม ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา  
 49 มา (Kaushik and Islam, 1995) พบว่า การใช้น้ำที่มีเกลือคลอไรด์ผสมในคอนกรีตกลับส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัด  
 50 สูงขึ้น แต่การใช้งานของคอนกรีตในโครงสร้างทั่วไป จำเป็นต้องมีเหล็กเสริมในคอนกรีตเพื่อใช้รับแรงดึง คอนกรีตที่มี  
 51 เหล็กเสริมจะส่งผลให้การทำลายเนื่องจากคลอไรด์ต่อโครงสร้างคอนกรีตมีความชัดเจนและรุนแรงมากขึ้น การวัดการ  
 52 แทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีเงื่อนไขของการทดสอบที่แตกต่างกัน ทั้งด้าน  
 53 ระยะเวลาที่ใช้ทดสอบ กระบวนการทดสอบ ตลอดจนผลที่ได้จากการทดสอบก็แสดงค่าแตกต่างกัน การทดสอบ  
 54 ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต มักแสดงผลในลักษณะของแนวโน้มในการ  
 55 ต้านทานคลอไรด์ โดยเฉพาะในการทดสอบที่ใช้ระยะเวลาสั้น อย่างไรก็ตาม ข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีต  
 56 จำเป็นต้องทราบอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ที่แสดงค่าจริงจากการแทรกซึมในสภาวะธรรมชาติ ที่ตัวอย่าง  
 57 คอนกรีตสัมผัสอยู่ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์สถานะการกัดกร่อนภายใต้ระยะเวลาที่โครงสร้างมีการใช้งานได้อย่าง  
 58 ถูกต้องมากขึ้น แต่ในการทดสอบเพื่อให้ได้ข้อมูลดังกล่าวต้องใช้เวลาในการศึกษายาวนาน ตลอดจนเสีย  
 59 ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ดังนั้นถ้ามีการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบของการแทรกซึมคลอไรด์ใน  
 60 คอนกรีต ที่ทำได้ง่ายในระยะเวลาสั้นกับผลการทดสอบที่ต้องใช้ระยะเวลานาน ก็จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษา  
 61 พฤติกรรมด้านความคงทนที่ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาได้

62 การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยวิธี Bulk diffusion test  
 63 ตามมาตรฐาน ASTM C1556 เป็นอีกวิธีที่สามารถทำได้ง่ายในห้องปฏิบัติการ ใช้ระยะเวลาในการทดสอบ 35 วัน โดย  
 64 ผลการทดสอบแสดงในรูปของเส้นกราฟการแทรกซึมของคลอไรด์ (chloride penetration profile) และสามารถใช้ในการ  
 65 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้ ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ  
 66 ทดสอบหาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมแก้วนำหินโดยวิธี Bulk diffusion test ที่วัดผลการแทรกซึม

67 โดยการไทเทรต (titration test) โดยใช้ น้ำ เป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM C 1218 เพื่อใช้ผลดังกล่าวในการ  
 68 ประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล เป็นเวลานานถึง 12 ปี ที่หาจากปริมาณคลอ  
 69 ไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบตาม ASTM C 1218 ซึ่งเป็นการประเมินผลทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่  
 70 ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่ง จากวิธีการทดสอบที่ทำได้ง่ายและรวดเร็ว เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการออกแบบ  
 71 โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการใช้งานบริเวณชายฝั่งทะเล ตลอดจนอาจใช้เป็นข้อมูลในการประเมิน  
 72 สถานะการกัดกร่อนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ระหว่างการใช้งาน เพื่อวางแผนซ่อมแซมโครงสร้าง ดังกล่าวได้  
 73 อย่างมีประสิทธิภาพ

74

## 75 วิธีการดำเนินการวิจัย

### 76 วัสดุประสาน

77 การศึกษาที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานดังนี้

#### 78 เถ้าถ่านหิน

79 การศึกษาครั้งนี้ใช้เถ้าถ่านหินที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.22 มีอนุภาคที่ค้างตะแกรง  
 80 เบอร์ 325 ร้อยละ 31 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก สำหรับ  
 81 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีผลรวมของสารประกอบหลัก  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เท่ากับร้อยละ 74.34  
 82 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.11 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ  
 83 ประสาน แสดงดังตารางที่ 1

#### 84 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

85 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 3.15 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
 86 ทั่วไปตามมาตรฐาน ASTM C150 ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 ความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่า  
 87 น้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 20 พื้นที่ผิวจำเพาะวิธีของเบลนเท่ากับ 3,250  $\text{cm}^2/\text{g}$ . และมีค่าเฉลี่ยของ  
 88 อนุภาค ( $d_{50}$ ) ที่ทดสอบจากการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน เท่ากับ 25 ไมโครเมตร ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์  
 89 ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีออกไซด์หลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์  
 90 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) รวมกันได้ร้อยละ 96.29 (ตารางที่ 1)

#### 91 มวลรวม

92 การศึกษาครั้งนี้ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด โดยมีค่ามอดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.75 และความ  
 93 ถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 19 มม. มีค่ามอดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.89 และมี  
 94 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.73 ร้อยละการของดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดเท่ากับ 0.45 และ 0.91  
 95 ตามลำดับ

96

97

98

99

100

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เก้าถ่านหิน
Silicon Dioxide, SiO <sub>2</sub>	21.52	35.12
Aluminum Oxide, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.56	21.51
Iron Oxide, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.51	17.71
Calcium Oxide, CaO	66.70	17.15
Magnesium Oxide, MgO	1.06	-
Sodium Oxide, Na <sub>2</sub> O	0.10	0.69
Potassium Oxide, K <sub>2</sub> O	0.24	1.59
Sulfur Trioxide, SO <sub>3</sub>	2.11	2.13
Loss On Ignition, LOI	1.74	0.11

101

## 102 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

103 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยวิธี Bulk diffusion test

104 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยวิธี Bulk  
 105 diffusion test (ASTM C1556) ได้ใช้ส่วนผสมคอนกรีตเดียวกันกับกลุ่มที่แช่น้ำทะเลเมื่อ 12 ปีที่แล้ว ซึ่งเป็นคอนกรีตของ  
 106 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 0.55 และ 0.65 โดยแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อ  
 107 วัสดุประสานแทนที่เก้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 35  
 108 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ตารางที่ 2) หล่อตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200  
 109 มม. และตัดตัวอย่างทดสอบให้มีความหนาประมาณ 60 มม. หลังจากนั้นเคลือบอีพ็อกซีที่ขอบของตัวอย่างทั้งหมดโดยเปิดไว้  
 110 1 ด้าน เพื่อให้เกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในทิศทางเดียว และปมตัวอย่างคอนกรีต เป็นเวลา 28 วัน จากนั้นแช่ในสารละลาย  
 111 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 2.8 โมลาร์ ก่อนทดสอบความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ ที่วัดในรูปของกราฟการแทรก  
 112 ซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ซึ่งตัดตัวอย่างคอนกรีตเป็นชั้นๆ หนาชั้นละ 10 มม. หลังจากนั้นนำคอนกรีตมาบดผ่านตะแกรง  
 113 เบอร์ 20 และนำผงคอนกรีตไปทำการไทเทรต ตามมาตรฐาน ASTM C1218 ที่อายุหลังแช่ 35 วัน การเตรียมตัวอย่างเพื่อ  
 114 ทดสอบการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธี Bulk diffusion test แสดงดังภาพที่ 1(ก)

115 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี

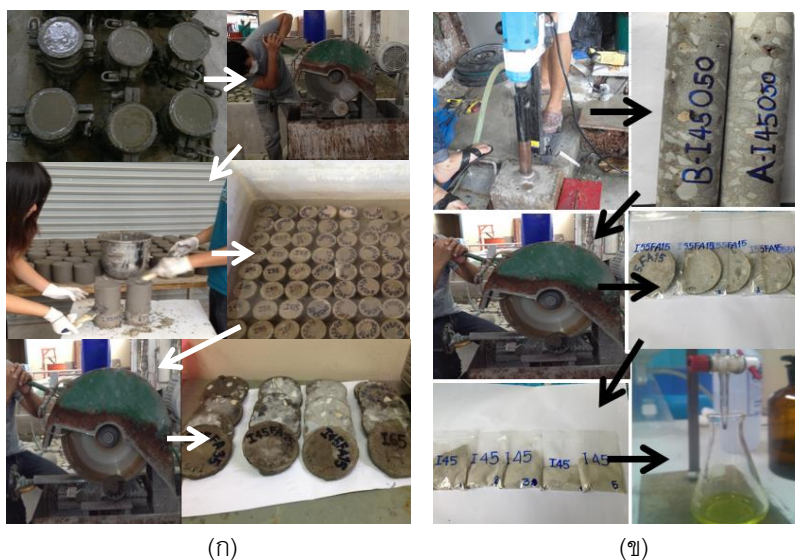
116 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล ได้นำตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเก้าถ่านหินที่แช่น้ำ  
 117 ทะเลเป็นเวลา 12 ปี มาเจาะบริเวณกึ่งกลางของก้อนตัวอย่าง แล้วนำแท่งคอนกรีตที่ได้จากการเจาะมาตัดเป็นชั้นตามระยะ  
 118 ความลึกต่างๆ โดยให้ลึกลงไปประมาณ 80 มม. (ตัดตัวอย่างหนาชั้นละ 10 มม.) จากนั้นบดตัวอย่างคอนกรีตแต่ละชั้นให้  
 119 ละเอียด และนำผงคอนกรีตที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 มาทดสอบปริมาณคลอไรด์ โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน  
 120 ASTM C 1218 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลที่อายุ 12 ปี แสดงดังภาพที่ 1(ข)

121

## 122 ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีต

อัตราส่วนน้ำต่อ วัสดุประสาน (W/B)	ร้อยละการ แทนที่เถ้าถ่าน หิน	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม. <sup>3</sup> )				
		ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่าน หิน	ทราย	หิน	น้ำ
0.45	0	478	0	639	1024	215
	15	406	72	639	1004	215
	25	359	119	639	990	215
	35	311	167	639	977	215
	50	239	239	639	957	215
0.55	0	478	0	639	971	262
	15	406	72	639	948	262
	25	359	119	639	933	262
	35	311	167	639	918	262
	50	239	239	639	897	262
0.65	0	478	0	639	922	311
	15	406	72	639	898	311
	25	359	119	639	881	311
	35	311	167	639	864	311
	50	239	239	639	840	311

123

124  
125

126 ภาพที่ 1 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตโดย ก) การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธี

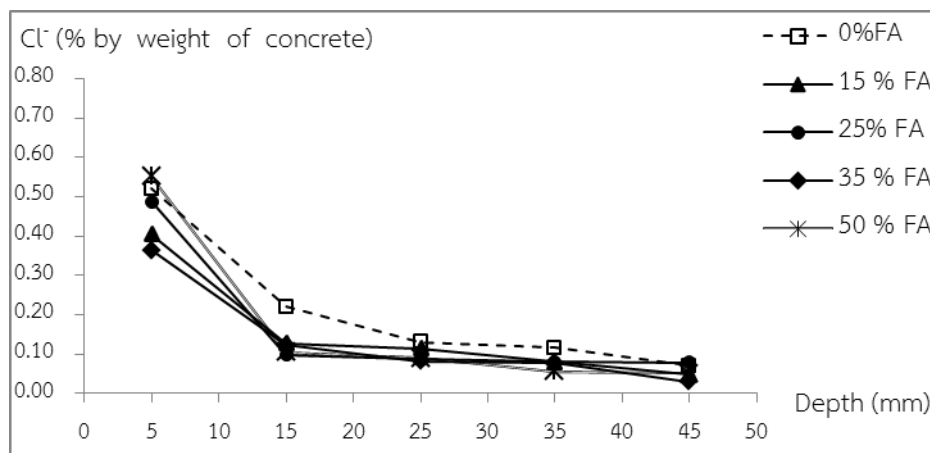
127 Bulk diffusion test ข) การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลที่อายุ 12 ปี

## 128 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

## 129 ผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

130 พิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ดังภาพ  
 131 ที่ 2 พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าลดลง โดยมีแนวโน้มเหมือนกันในทุก  
 132 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 0  
 133 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 25 มม. หลังแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์  
 134 เข้มข้น 2.8 โมลาร์ เป็นเวลา 35 วัน เท่ากับร้อยละ 0.13 0.11 0.09 0.08 และ 0.07 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซ  
 135 โซลันระหว่างเถ้าถ่านหินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลดีต่อคุณสมบัติทางด้านความ  
 136 คงทนของคอนกรีต โดยสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกาและอลูมินาในเถ้าถ่านหินเกิดปฏิกิริยา  
 137 ปอซโซลันทำให้ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งช่วยลดช่องว่างในซีเมนต์  
 138 เพสต์ลงและคอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น (Neville, 1996; Sata *et al.*, 2012)

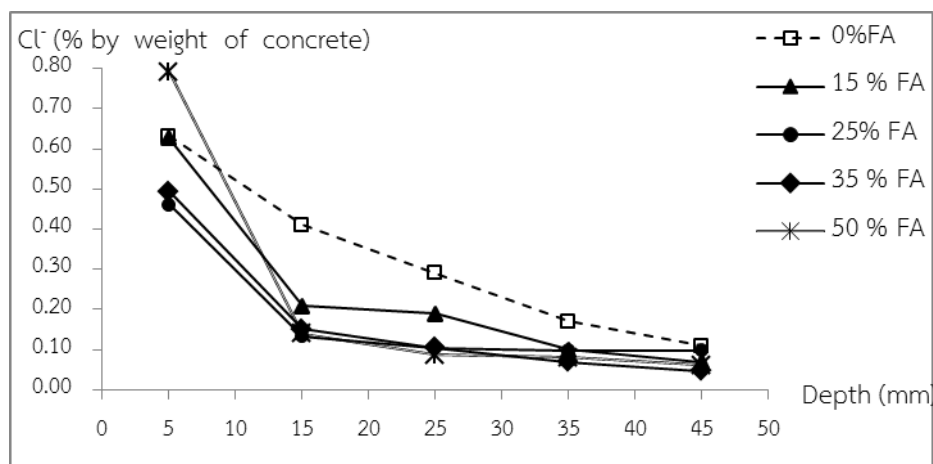
139



140

141

ก) W/B = 0.45

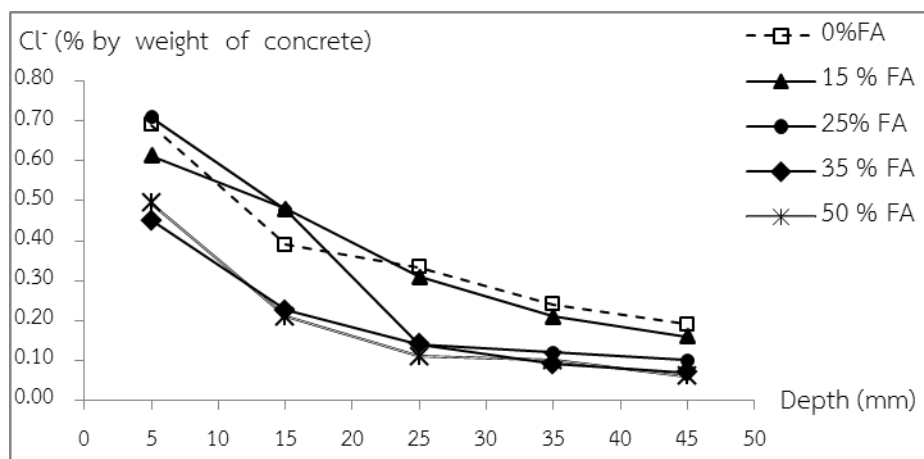


142

143

ข) W/B = 0.55





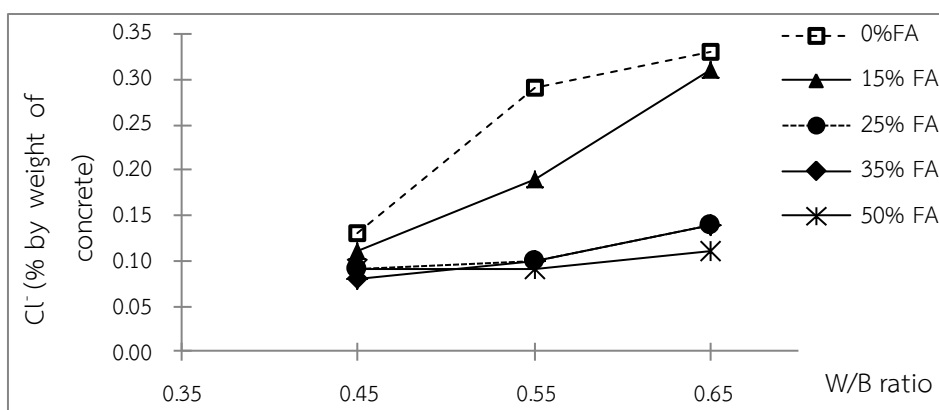
(ค) W/B = 0.65

ภาพที่ 2 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

#### ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆ ลดลงและมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกอัตราส่วนการแทนที่เถ้าถ่านหิน ซึ่งเกิดจากปริมาณน้ำในคอนกรีตที่ลดลง ส่งผลให้คอนกรีตมีความชื้นน้ำมากขึ้นและลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ โดยสังเกตเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เช่น การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลงจาก 0.55 เป็น 0.45 ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 25 มม. (ภาพที่ 3(ก)) ในคอนกรีตธรรมดาลดลงร้อยละ 0.16 (ลดลงจาก 0.29 ในคอนกรีตที่มี W/B = 0.55 เป็น 0.13 ในคอนกรีตที่มี W/B = 0.45) ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัวัสดุประสาน พบว่าการลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจาก 0.55 เป็น 0.45 ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกเดียวกันลดลงแค่อ้อยู่ 0.08 (ลดลงจาก 0.19 ในคอนกรีตที่มี W/B = 0.55 เป็น 0.11 ในคอนกรีตที่มี W/B = 0.45) และมีแนวโน้มเหมือนกันกับปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมที่ระดับความลึก 35 มม. ดังแสดงในภาพที่ 3(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการลดลงของคลอไรด์ ที่แทรกซึมในคอนกรีตธรรมดา มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เป็นผลจากความชื้นน้ำในคอนกรีตธรรมดาขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็นหลัก โดยปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตที่ลดลง ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตธรรมดาสูงขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งทำให้คอนกรีตมีความชื้นน้ำและลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาได้ (Neville, 1996) ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน นอกจากที่ความชื้นน้ำในคอนกรีตจะขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแล้ว ยังขึ้นกับลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าถ่านหินด้วย (Neville, 1996 ; Chindapasirt *et al.*, 2005 ; Chalee *et al.*, 2009 ; Sata *et al.*, 2012) โดยเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงและมีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วย ซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ในปริมาณสูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลให้เกิดความชื้นน้ำในคอนกรีตและสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดี (Chalee *et al.*, 2009 ; Sata *et al.*, 2012) ดังนั้นจะเห็นได้ว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ไม่ได้เป็นปัจจัยหลักเพียงอย่างเดียว ที่ส่งผลให้คอนกรีตสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ แต่การใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีถือเป็นปัจจัยที่สำคัญในการ

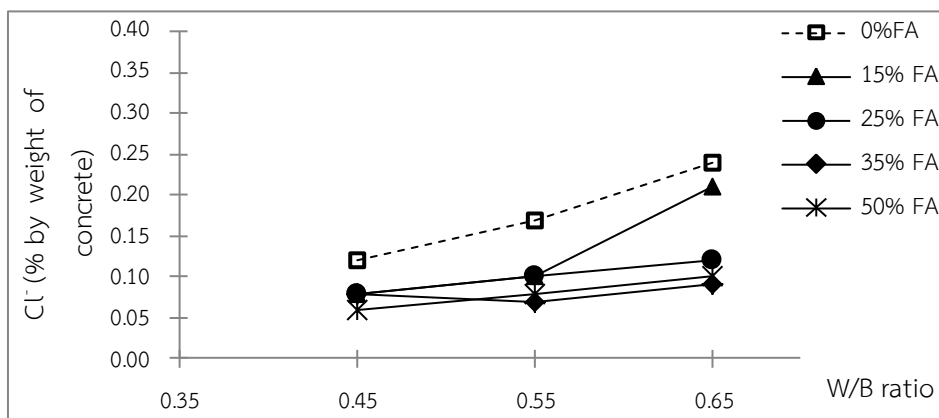
169 ปรับปรุงคอนกรีตให้สามารถต้านทานการทำให้ละลายเนื่องจากเกลือคลอไรด์ได้ โดยผลการศึกษาค้นพบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ  
 170 ประสานที่ลดลงในคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้น้อยลง เช่น  
 171 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุ เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลงจาก 0.55 เป็น  
 172 0.45 ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 25 มม. ลดลงเท่ากับ 0.16 0.08 0.01 0.02 และ 0 ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษ  
 173 ดังกล่าวนี้ สอดคล้องกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในงานวิจัยที่ผ่านมา (Chalee *et al.*, 2009)  
 174



175

176

ก) ความลึก 25 มม.



177

178

ข) ความลึก 35 มม.

179 **ภาพที่ 3** ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

180

181 การหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

182 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ( $D_{CB}$ ) และหลังแช่น้ำ  
 183 ทะเลเป็นเวลา 12 ปี ( $D_C$ ) ได้ใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) (Crank, 1975) ดังแสดงในสมการที่ (1)

184

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{CB} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

185 เมื่อค่า  $D_{CB}$  ในสมการที่ (1) เป็นค่าคงที่ ค่าตอบทั่วไปของสมการที่ (1) แสดงดังสมการที่ (2)

$$186 \quad C_{x,t} = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{CB}t}} \right) \right] \quad (2)$$

187 เมื่อ  $C_{x,t}$  = ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) ที่ระดับความลึก  $x$  และระยะเวลาในการแช่  $t$

188  $x$  = ระยะจากหน้าผิวคอนกรีต (มม.)

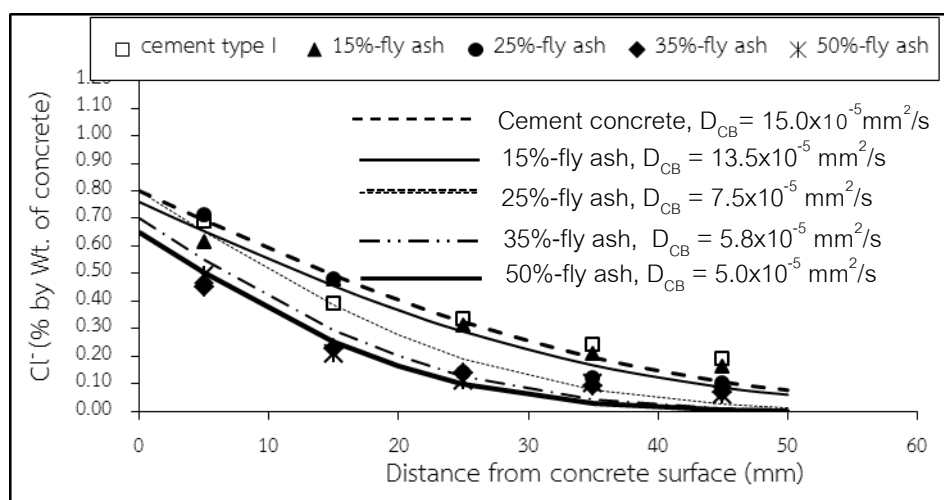
189  $t$  = ระยะเวลาที่แช่ (วินาที)

190  $C_0$  = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (ที่  $x = 0$ ) ที่ระยะเวลาแช่  $t$

191  $D_{CB}$  = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ที่ระยะเวลาแช่  $t$  ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test  
192 (มม<sup>2</sup>/วินาที)

193  $\operatorname{erf}$  = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error function)

194 ทำการปรับค่า  $D_{CB}$  และ  $C_0$  ในสมการที่ (2) เพื่อให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ส่วนผสมต่างๆ  
195 มากที่สุด ดังภาพที่ 4 ที่แสดงการหาค่า  $D_{CB}$  และ  $C_0$  โดยใช้สมการที่ (2) ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ที่มี  
196 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ใน  
197 คอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี หาได้ในลักษณะเดียวกันโดยแทนค่า  $D_{CB}$  ด้วย  $D_c$  และปรับค่า  $D_c$  ในสมการที่ (2) ให้  
198 กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล โดยตารางที่ 3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึม  
199 ของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test และที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี  
200



201 **ภาพที่ 4** การหาค่า  $D_{CB}$  ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่ทดสอบโดย  
202 วิธี Bulk diffusion test  
203

204

205 ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ( $D_{CB}$ ) และหลังแช่น้ำทะเล  
206 เป็นเวลา 12 ปี ( $D_C$ )

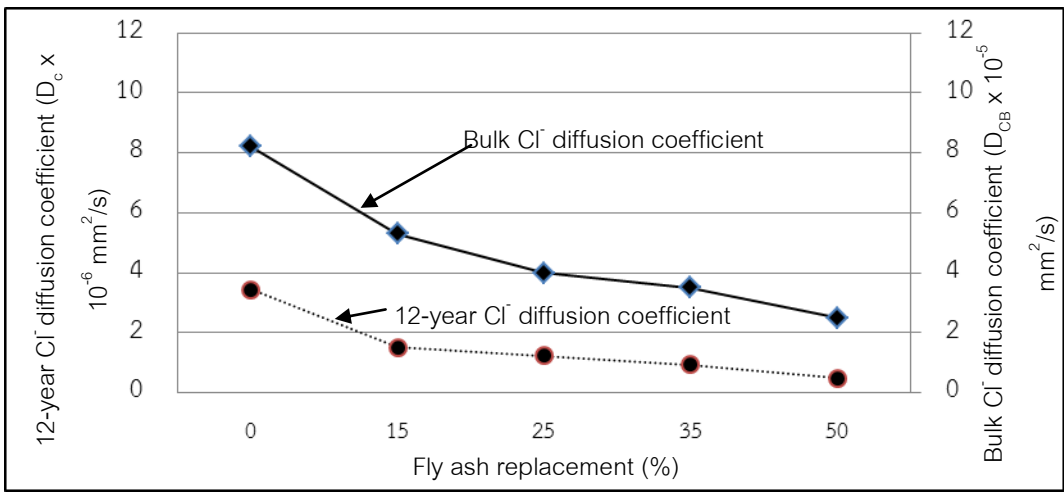
ส่วนผสม	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (มม <sup>2</sup> /วินาที)	
	$D_{CB} \times 10^{-6}$	$D_C \times 10^{-6}$
I45	82.00	3.45
I45FA15	53.00	1.51
I45FA25	40.00	1.23
I45FA35	35.00	0.93
I45FA50	25.00	0.49
I55	105.00	6.10
I55FA15	75.00	2.25
I55FA25	65.00	1.51
I55FA35	52.00	1.19
I55FA50	35.00	0.63
I65	150.00	7.12
I65FA15	135.00	2.53
I65FA25	75.00	2.05
I65FA35	58.00	1.71
I65FA50	50.00	1.19

207  
208 ผลของเถ้านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test และที่แช่น้ำทะเล  
209 12 ปี

210 เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ( $D_{CB}$ ) ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าน  
211 ถ่านหิน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 0.55 และ 0.65 เทียบกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ใน  
212 คอนกรีต หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี ( $D_C$ ) ดังภาพที่ 5 พบว่า การใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
213 ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test  
214 มีแนวโน้มลดลง และมีทิศทางเดียวกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสภาพแวดล้อมทะเล 12 ปี  
215 เนื่องจากคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินในปริมาณที่สูงขึ้น ปฏิกริยาปอซโซลานในระยะยาวมีผลทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ และ  
216 ลดอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี ได้ (Chindaprasirt *et al.*, 2005 ; Chalee *et al.*,  
217 2009) การผสมเถ้านหินสามารถลดอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตได้อย่างชัดเจน โดยการแทนที่เถ้าน  
218 หินในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้  $D_{CB}$  และ  $D_C$  มีค่าลดลงเป็นแนวโน้มในทางเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การทดสอบใน  
219 ห้องปฏิบัติการ (ระยะสั้น) และผลทดสอบในภาคสนามที่เป็นสิ่งแวดล้อมจริง (ระยะยาว) มีผลทดสอบที่สอดคล้องกัน โดยจะ  
220 เห็นได้ว่า  $D_{CB}$  มีแนวโน้มเดียวกับ  $D_C$  แต่มีค่าสูงกว่าค่อนข้างมาก เนื่องจากสารละลายคลอไรด์ที่ใช้แช่ตัวอย่างคอนกรีตโดยวิธี  
221 Bulk diffusion test มีความเข้มข้นสูงถึง 2.8 โมลาร์ และสูงกว่าความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเลที่แช่ตัวอย่างทดสอบ  
222 ในภาคสนามที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ประมาณ 0.50 โมลาร์ (Chalee *et al.*, 2010) จึงส่งผลให้อัตราการแทรกซึมของ

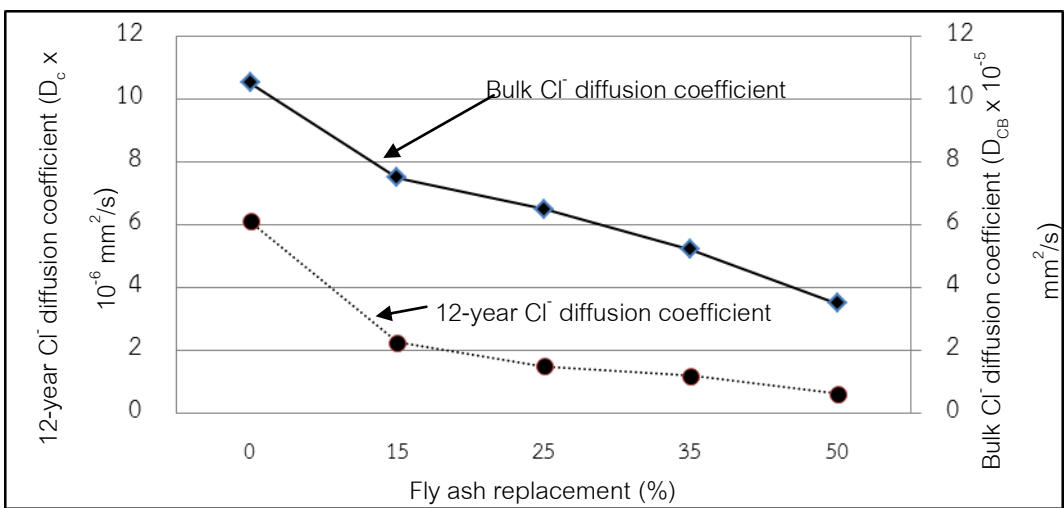
223 คลอไรด์ที่วัดในรูปสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์สูงกว่ากลุ่มที่แช่ในน้ำทะเลอย่างชัดเจน โดยการทดสอบวิธี Bulk  
224 diffusion test กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ สามารถเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาสัมประสิทธิ์การแทรกซึม  
225 คลอไรด์ในระยะยาวภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล จากผลทดสอบ Bulk diffusion test ที่อายุ 35 วัน ได้

226



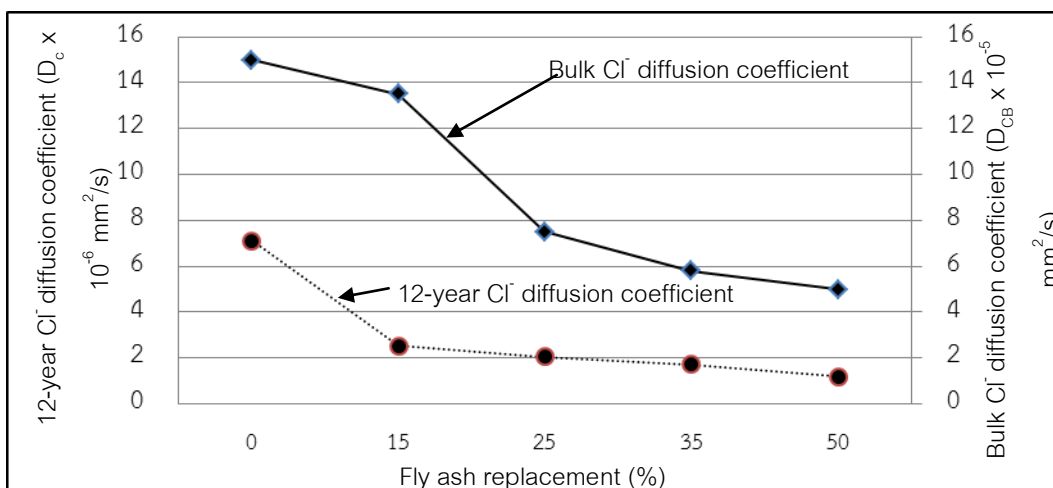
227  
228

ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45



229  
230

ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55



231

232

ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.65

233

ภาพที่ 5 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ( $D_{CB}$ )

234

กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี ( $D_C$ )

235

การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตระยะยาวจากผลทดสอบ Bulk diffusion test

237

การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี จากผลทดสอบโดยวิธี

238

Bulk diffusion test สามารถประเมินคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตในระยะยาว จากผลการทดสอบระยะสั้นใน

239

คอนกรีตที่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0 15 25 35 และ 50 โดยใช้น้ำหนักวัสดุประสาน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

240

0.55 และ 0.65 ดังภาพที่ 6 โดยใช้หลักการวิเคราะห์เชิงถดถอย (regression analysis) ได้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์

241

การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ( $D_{CB}$ ) กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลัง

242

แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี ( $D_C$ ) ดังสมการที่ (3) ถึง (7)

243

$$D_C = 0.496D_{CB} - 0.021 \quad (\text{คอนกรีตธรรมดา}) \quad (3)$$

244

$$D_C = 0.108D_{CB} + 1.150 \quad (\text{คอนกรีตผสมเส้นผ่านศูนย์กลาง 15}) \quad (4)$$

245

$$D_C = 0.321D_{CB} - 0.173 \quad (\text{คอนกรีตผสมเส้นผ่านศูนย์กลาง 25}) \quad (5)$$

246

$$D_C = 0.298D_{CB} - 0.165 \quad (\text{คอนกรีตผสมเส้นผ่านศูนย์กลาง 35}) \quad (6)$$

247

$$D_C = 0.287D_{CB} - 0.284 \quad (\text{คอนกรีตผสมเส้นผ่านศูนย์กลาง 50}) \quad (7)$$

248

เมื่อ  $D_C$  = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล

250

เป็นเวลา 12 ปี ( $\times 10^{-6}$  มม<sup>2</sup>/วินาที)

251

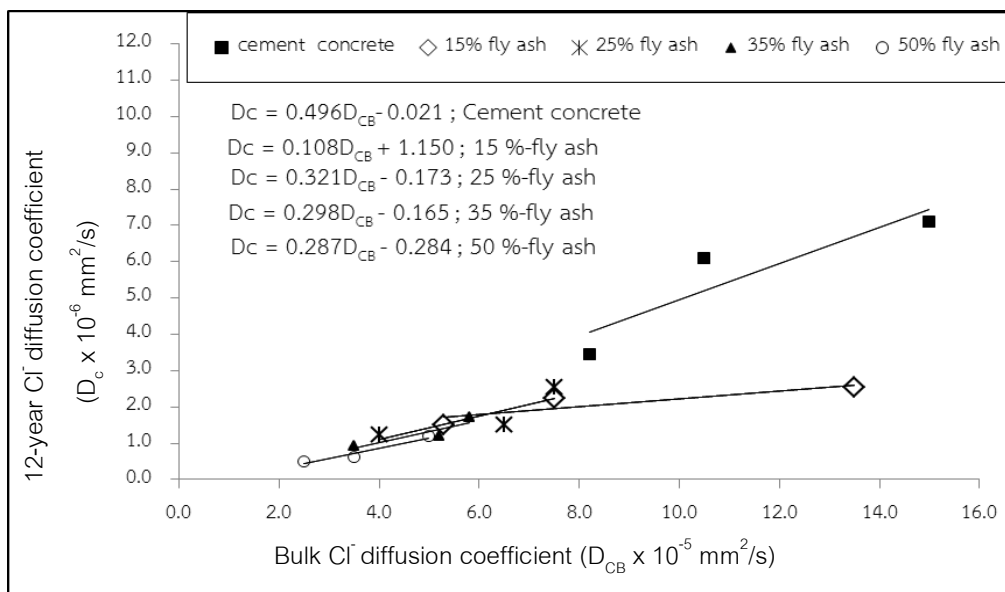
$D_{CB}$  = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

252

( $\times 10^{-5}$  มม<sup>2</sup>/วินาที)

253

254



255 ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี  $D_c$  กับ  
 256 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ( $D_{CB}$ )  
 257

258

#### 259 สรุปผลการวิจัย

260 ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

- 261 1. การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ใน  
 262 คอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test มีแนวโน้มลดลง
- 263 2. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำลง ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion  
 264 test ลดลง โดยการลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน มีผลต่อการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา  
 265 มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน
- 266 3. การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอ  
 267 ไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test มีแนวโน้มลดลงและมีทิศทางเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของ  
 268 คลอไรด์ในคอนกรีต หลังแช่คอนกรีตในน้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี
- 269 4. ข้อมูลจากการศึกษาครั้งนี้ สามารถประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่  
 270 ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หลังจากแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี จากผล  
 271 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ได้

272

#### 273 กิตติกรรมประกาศ

274 ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) มหาวิทยาลัยบูรพา  
 275 ประจำปีงบประมาณ 2557

276

277

## 278 เอกสารอ้างอิง

- 279 ASTM C1556.(2008). Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of  
280 Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.02.*
- 281 ASTM C1218. (2008). Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of*  
282 *ASTM Standards; V. 04.02.*
- 283 ASTM C618. (1997). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in  
284 Concrete, fly ash, natural pozzolan, pozzolans. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*
- 285 ASTM C150.(1997). Standard Specification for Portland Cement. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*
- 286 Chalee, W., & Jaturapitakkul, C., (2009). Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion  
287 coefficient of concrete in marine environment. *Materials and Structures, 42*, 505 -514.
- 288 Chalee, W., Ausapanit, P. & Jaturapitakkul, C., (2010). Utilization of fly ash concrete in marine environment for long  
289 term design life analysis. *Materials and Design, 31*, 1242-1249.
- 290 Cheewaket, C., Jaturapitakkul, C. & Chalee, W., (2012). Initial corrosion presented by chloride threshold  
291 penetration of concrete up to 10 year-results under marine site. *Construction and Building Materials, 37*,  
292 693-698.
- 293 Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. & Sinsiri, T., (2005). Effect of fly ash fineness on compressive strength and  
294 pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites, 27*, 425 -428.
- 295 Crank, J., (1975). *The Mathematics of Diffusion, 2<sup>nd</sup>, ed.*, Oxford Press, London.
- 296 Dimitri Val, V., & Mark Stewart, G., (2003). Life Cycle Cost Analysis of Reinforced Concrete Structure in Marine  
297 Environments. *Structural Safety, 25*, 343-362.
- 298 Kaushik, S. K. and Islam, S., 1995 "Suitability Of Sea Water for Mixing Structural Concrete Exposed to a Marine  
299 Environment," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 17, pp. 177-185.
- 300 Neville, A.M., (1996). *Properties of Concrete, 4<sup>th</sup> ed.*, England, Addison Wesley
- 301 Sata, V., Tangpagasit, J., Jaturapitakkul, C. & Chindaprasirt, P., (2012). Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction  
302 of biomass ashes in Portland cement matrix. *Cement and Concrete Composites, 34*, 94 -100.
- 303
- 304
- 305
-