# ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล
# Chloride Penetration Depth in Concrete under Marine Exposure

กิรติกร เจริญพร้อม[1] และ วิเชียร ชาลี[2]*
Kiratikorn Charoenprom[1] and Wichian Chalee[2]*

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ศึกษาความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลาต่างๆ กัน โดยใช้คอนกรีตควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินแม่เมาะในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเหมือนกับคอนกรีตควบคุม หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200 มม.[3] เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ โดยบ่มคอนกรีตในน้ำจนมีอายุครบ 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเล จ.ชลบุรี หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งครบ 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี ได้ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย จากข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีต สามารถหาความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุแช่น้ำทะเลต่างๆ ได้ ผลการวิจัยพบว่า ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์มีอัตราการเพิ่มที่สูงในช่วง 5 ปีแรกที่คอนกรีตแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล การแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ลดลงอย่างชัดเจน นอกจากนั้นอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ส่งผลต่อการลดความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ตลอดจนกำลังอัดที่สูงขึ้นมีผลต่อการลดความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน นอกจากนั้นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถใช้ป้องกันการกัดกร่อนในคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสสิ่งแวดล้อมทะเลได้ดี เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี (กำลังอัดสูง) ควบคู่กับคุณสมบัติด้านความคงทนที่ดี (ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำ)

**คำสำคัญ:** สภาวะแวดล้อมทะเล เถ้าถ่านหิน ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ กำลังอัด

**Abstract**

The objectives of this research were to study the chloride penetration depth in concrete at various periods of marine exposure. Control concretes were designed by using Portland cement type I with water

[1] นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
* Corresponding Author, Tel. 0-3810-2222 Ext. 3358, E-mail: wichian@buu.ac.th

*รับเมื่อ 8 มีนาคม 2554 ตอบรับเมื่อ 8 มิถุนายน 2554*

to binder (W/B) ratios of 0.45, 0.55 and 0.65. Mae Moh fly ash was used as a partial replacement of Portland cement type I at 15, 25, 35, and 50% by weight of binder with the same W/B ratio of the control concretes. Concrete cylinder specimens of 100 mm in diameter and 200 mm in height were prepared for compressive strength test at 28 days. For chloride penetration test, concrete cube specimens of 200 $mm^3$ were casted and then cured in fresh water for 28 days. After that, the specimens were placed in a tidal zone of marine environment in Chonburi province. Subsequently, the water soluble chlorides in the concrete were measured after the concrete was exposed to the tidal zone for 3, 4, 5, 7 and 10 years. The chloride penetration depths in concrete at various times of marine exposure were obtained from chloride penetration profiles. The results showed that the chloride penetration depth of all concretes increased at a high rate in the first 5-year exposure to the marine environment. The chloride penetration depth of concrete clearly decreased with the increase of fly ash proportion in the concrete. When the W/B ratio of concrete was reduced, the decrease of chloride penetration depth in normal concrete was higher than that of the fly ash concrete. In addition, the increase in the compressive strength of concrete more effectively reduced chloride penetration depth in normal concrete than that in the concrete containing fly ash. Besides, the use of 15%-35% fly ash in concrete with a W/B ratio of 0.45 can be used to improve corrosion resistance of reinforced steel in concrete under seawater because it produced good mechanical properties (high compressive strength) together with good durability properties (low chloride penetration depth)

**Keywords:** Marine Environment, Fly Ash, Chloride Penetration Depth, Compressive Strength

## 1. บทนำ

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้สามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเล นอกจากจะส่งผลต่ออายุการใช้งานที่ยาวนานของโครงสร้างแล้ว ยังมีผลต่อการกำหนดระยะหุ้มเหล็กที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถป้องกันสารเคมีที่เป็นอันตรายเข้าไปทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วย ในการกำหนดระยะหุ้มเหล็กของโครงสร้างที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเล สามารถพิจารณาจากความลึกของคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตหลังจากที่คอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเล ซึ่งความลึกที่คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตหลังจากแช่น้ำทะเลที่อายุต่างๆ นอกจากจะบ่งชี้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลแล้ว ยังสามารถใช้เป็นข้อมูลเพื่อบ่งชี้อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลเมื่อใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต่างๆ ได้ โดยคอนกรีตที่มีอัตราการเพิ่มของความลึกที่คลอไรด์แทรกซึมที่มาก จะส่งผลให้เหล็กเสริมเริ่มมีการกัดกร่อนรวดเร็วยิ่งขึ้น ตลอดจนทำให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานที่สั้นลง จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การเริ่มต้นเกิดสนิมที่ผิวของเหล็กเพียงเล็กน้อยก็จะนำไปสู่การทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว [1] ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตจะมีระดับสูงกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติตลอดจนความเป็นด่างที่ผิวเหล็กเสริมลดลงและฟิล์มบางที่ป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมถูกทำลาย เมื่อมีความชื้นและออกซิเจนก็จะส่งผลให้เกิดสนิมและกัดกร่อนเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นในอัตราที่เร็ว

การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้อย่างชัดเจน [2]-[6] ซึ่งสามารถยืดระยะเวลาที่เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเริ่มกัดกร่อนได้ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์กับระยะเวลาที่คอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลประกอบในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่คำนึงถึงความคงทนเพื่อใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลได้ ตลอดจน

ได้ทราบข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่โครงสร้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตกับระยะเวลาที่แช่คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยศึกษาถึงผลของเถ้าถ่านหินและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วย เพื่อที่จะได้ทราบระยะเวลาคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล เริ่มที่จะมีการกัดกร่อนเหล็กเสริมภายใต้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่กำหนดตลอดจนได้ทราบฐานข้อมูลเพื่อประกอบในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตและระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่เหมาะสมให้สามารถใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเลได้ยาวนานต่อไป

## 2. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้ได้เก็บข้อมูลด้านความคงทนจากตัวอย่างที่ได้เตรียมไว้เมื่อ 10 ปีที่แล้ว โดยรายละเอียดของตัวอย่างที่ได้เตรียมไว้มีดังนี้

### 2.1 วัสดุประสานและมวลรวม

วัสดุประสานใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหินชนิด F ที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 มีอนุภาคที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 [7] ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีปริมาณผลรวมของสารประกอบหลัก $SiO_2$, $Al_2O_3$ และ $Fe_2O_3$ เท่ากับร้อยละ 79.45 และ มีค่า LOI ร้อยละ 0.52 โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานแสดงดังตารางที่ 1

มวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 19 มม. และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.66 ส่วนมวลรวมละเอียดมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.63 ซึ่งสอดคล้องกับค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบที่มีค่าระหว่าง 5.5-8.5 และมวลรวมละเอียดมีค่าระหว่าง 2.2-3.1 [8] ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C127-88 [9] และ C128-93 [10] โดยที่ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดของมวลรวมหยาบและละเอียดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.77 และ 2.57 ตามลำดับ สอดคล้องกับค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมที่มีค่าระหว่าง 1.6-3.2 [8]

**ตารางที่ 1** องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

| องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ) | วัสดุ | |
|---|---|---|
| | ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 | เถ้าถ่านหิน (FA) |
| Silicon Dioxide, $SiO_2$ | 20.80 | 44.95 |
| Aluminium Oxide, $A_{l2}O_3$ | 5.50 | 23.70 |
| Iron Oxide, $Fe_2O_3$ | 3.16 | 10.80 |
| Calcium Oxide, CaO | 64.97 | 13.80 |
| Magnesium Oxide, MgO | 1.06 | 3.47 |
| Sodium Oxide, $Na_2O$ | 0.08 | 0.07 |
| Potassium Oxide, $K_2O$ | 0.55 | 2.38 |
| Sulfur Trioxide, $SO_3$ | 2.96 | 1.31 |
| Loss On Ignition, LOI | 2.89 | 0.52 |

**ตารางที่ 2** คุณสมบัติของมวลรวม

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

### 2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

คอนกรีตที่ใช้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 โดยใช้เถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 3 หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 100x200 มม.$^2$ เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และหล่อคอนกรีตลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม.$^3$ เพื่อใช้ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

หลังแช่คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำประปาจนมีอายุครบ 28 วัน จึงนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลที่ชายหาดบริเวณโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา จ. ชลบุรี ในสภาวะเปียกสลับแห้ง ซึ่งคุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณดังกล่าว พบว่าน้ำทะเลมีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9-8.2 และปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000-19,000 มก./ล. ส่วนซัลเฟตระหว่าง 2,200-2,700 มก./ล. โดยผลที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของสถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล [11] ที่พบว่าบริเวณชายฝั่งทะเลศรีราชามีค่าความเป็นกรดด่างระหว่าง 7.9-8.6 หลังจากตัวอย่างคอนกรีตแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี จึงนำคอนกรีตมาเจาะตรงบริเวณกึ่งกลางของก้อนตัวอย่าง และตัดแท่งคอนกรีตที่ได้จากการเจาะเป็นชั้นให้มีความหนาชั้นละ 10 มม. เพื่อทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ตาม ASTM C1218 [12] ซึ่งเป็นปริมาณคลอไรด์อิสระที่อยู่ในโพรงของคอนกรีต

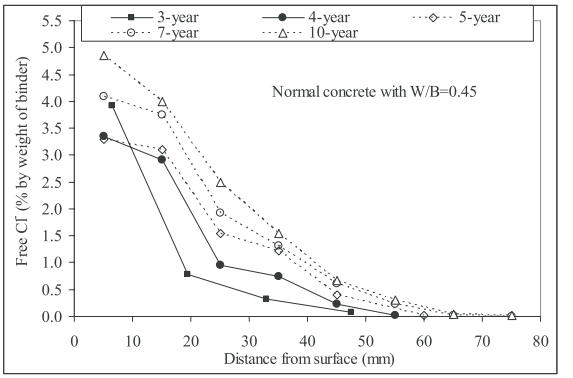
## 3. วิเคราะห์ผลการศึกษา

### 3.1 ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต

ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตแสดงถึงความลึกที่คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าถึงโดยทั่วไปความลึกดังกล่าวจะขึ้นกับความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ที่คอนกรีตสัมผัส คุณสมบัติของคอนกรีตและระยะเวลาที่คอนกรีตสัมผัสกับเกลือคลอไรด์ ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตเพื่อต้านทานการทำลายเนื่องจากเกลือคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมทะเล สามารถใช้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ประกอบในการพิจารณาระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อน หรือใช้ความลึกดังกล่าวในการประเมินความเสียหายของโครงสร้างที่มีการใช้งานในสภาพแวดล้อมทะเลอยู่แล้ว ในการศึกษาครั้งนี้ได้หาความลึกของการแทรกซึมปริมาณคลอไรด์ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1 จากการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี สามารถระบุความลึกจากผิวคอนกรีตที่ให้ปริมาณคลอไรด์เท่ากับศูนย์ หลังจากที่คอนกรีตแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี ได้เท่ากับ 48, 55, 60, 65 และ 71 มม. ตามลำดับ โดยที่ส่วนผสมคอนกรีตอื่นสามารถหาความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุแช่น้ำทะเลต่างๆ กันได้ในลักษณะเดียวกัน

**ตารางที่ 3** อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

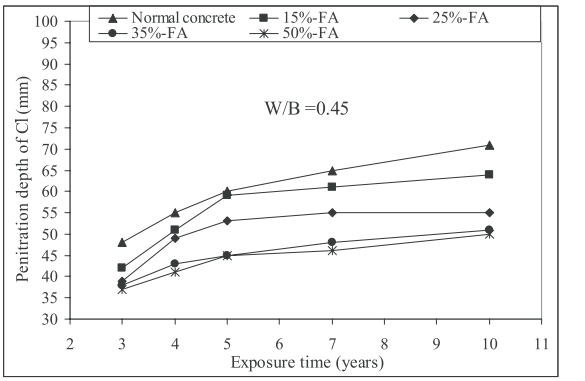
| ส่วนผสม | เถ้าถ่านหิน (ร้อยละ) | ส่วนผสมคอนกรีต (กก/ม³) | | | | | W/B |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 | เถ้าถ่านหิน | มวลรวมละเอียด | มวลรวมหยาบ | น้ำ | |
| I45 | 0 | 478 | - | 639 | 1,024 | 215 | 0.45 |
| I45FA15 | 15 | 406 | 72 | 639 | 1,004 | 215 | 0.45 |
| I45FA25 | 25 | 359 | 119 | 639 | 990 | 215 | 0.45 |
| I45FA35 | 35 | 311 | 167 | 639 | 977 | 215 | 0.45 |
| I45FA50 | 50 | 239 | 239 | 639 | 957 | 215 | 0.45 |
| I55 | 0 | 478 | - | 639 | 971 | 262 | 0.55 |
| I55FA15 | 15 | 406 | 72 | 639 | 948 | 262 | 0.55 |
| I55FA25 | 25 | 359 | 119 | 639 | 933 | 262 | 0.55 |
| I55FA35 | 35 | 311 | 167 | 639 | 918 | 262 | 0.55 |
| I55FA50 | 50 | 239 | 239 | 639 | 897 | 262 | 0.55 |
| I65 | 0 | 478 | - | 639 | 922 | 311 | 0.65 |
| I65FA15 | 15 | 406 | 72 | 639 | 898 | 311 | 0.65 |
| I65FA25 | 25 | 359 | 119 | 639 | 881 | 311 | 0.65 |
| I65FA35 | 35 | 311 | 167 | 639 | 864 | 311 | 0.65 |
| I65FA50 | 50 | 239 | 239 | 639 | 840 | 311 | 0.65 |



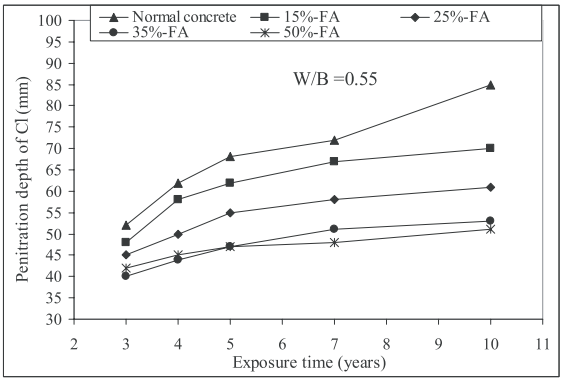

**รูปที่ 1** การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี

### 3.2 ผลของเถ้าถ่านหินและระยะเวลาแช่น้ำทะเลต่อความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์

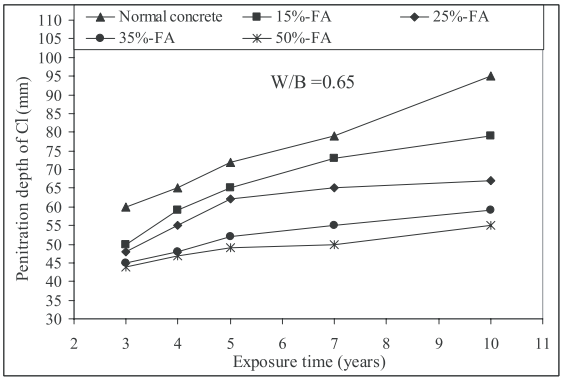
เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาต่อความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ดังแสดงในรูปที่ 2 และพิจารณากลุ่มที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 (รูปที่ 2(ก)) พบว่าความลึกของคลอไรด์ในช่วง 3 ปีแรกที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลไม่แตกต่างกันมากนัก แต่มีผลชัดเจนเมื่อแช่น้ำทะเลนานขึ้น โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมากขึ้น มีความลึกของคลอไรด์ที่ต่ำลงอย่างชัดเจนและเห็นชัดเจนเมื่อแช่น้ำทะเลนานขึ้น กล่าวคือการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินมีผลทำให้ลดความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตอย่างชัดเจนมากขึ้น เมื่อคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลนานขึ้น เช่น ที่อายุแช่น้ำทะเล 3 ปี พบว่าการผสมเถ้าถ่านหินในอัตราร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 (รูปที่ 2 (ก)) มีการลดลงของความลึกของการแทรกซึมเกลือคลอไรด์ จากคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินเท่ากับ 11 มม. (ลดจาก 48 มม. เป็น 37 มม.) และเมื่อระยะเวลาแช่น้ำทะเลนานขึ้นถึง 10 ปี พบว่าเถ้าถ่านหินส่งผลให้คอนกรีตกลุ่มดังกล่าวมีความลึกของการแทรกซึม




ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45




ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



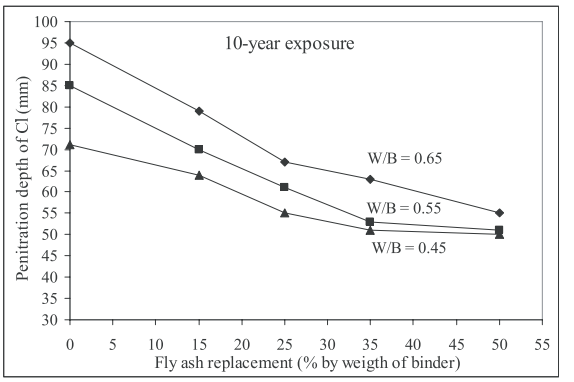

ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65

**รูปที่ 2** ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์กับระยะเวลาที่แช่คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล

คลอไรด์ลดลงถึง 23 มม. (ลดจาก 71 มม. ในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินเป็น 48 มม. ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50) การที่เถ้าถ่านหินมีผลต่อการลดความลึกการแทรกซึมของคลอไรด์มากขึ้น เมื่ออายุคอนกรีตนานขึ้น อาจเป็นผลจากระยะเวลาที่นานขึ้น ขนาดของโพรงในคอนกรีตจะลดลง ตลอดจนปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างสารประกอบซิลิก้าหรืออลูมินาในเถ้าถ่านหินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตมีความสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ จึงส่งผลให้ความลึกที่คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตลดลงได้ชัดเจน [4], [13]

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า คอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินมีการเพิ่มของความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์เมื่อเทียบกับระยะเวลาแช่น้ำทะเลมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินอย่างชัดเจน และการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความลึกที่คลอไรด์แทรกซึมเมื่อเทียบกับระยะเวลาแช่น้ำทะเลลดลง เช่น คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 มีการเปลี่ยนแปลงความลึกของคลอไรด์ที่แทรกซึม ในช่วง 3 ปี ถึง 10 ปี ที่แช่น้ำทะเลเท่ากับ 23, 22, 16, 13 และ 11 มม. ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้เป็นการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระ ดังนั้นนอกจากความลึกของการแทรกซึมจะขึ้นกับความทึบน้ำที่เป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแล้ว ยังขึ้นกับความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์อิสระอีกด้วย โดยคอนกรีตที่มีความสามารถในการการกักเก็บคลอไรด์ได้ดีจะช่วยลดปริมาณคลอไรด์อิสระที่แทรกซึมเข้าไปในโพรงของคอนกรีตได้ จากการศึกษาที่ผ่านมา [14], [15] พบว่าการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณที่สูงขึ้นสามารถเพิ่มความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตได้มากขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวทำให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์อิสระมีอัตราการเพิ่มตามระยะเวลาที่คอนกรีตแช่น้ำทะเลลดลงอย่างชัดเจนในกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น

เมื่อพิจารณารูปที่ 2 จะเห็นว่า ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์มีอัตราการเพิ่มที่สูงในช่วง 5 ปีแรกที่คอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเล หลังจากนั้นพบว่ามีอัตราการเพิ่มที่ลดลง (สังเกตจากความชันของกราฟที่สูงในช่วง 5 ปีแรกและมีแนวโน้มลดลงในช่วงหลัง) อย่างไรก็ตามในช่วง 5 ปีแรกที่คอนกรีตแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล จะพบความแตกต่างระหว่างความลึกที่คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปของกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินและคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินอย่างชัดเจน ทั้งนี้เป็นผลมาจากคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินมีอัตราการเพิ่มของความลึกที่คลอไรด์แทรกซึมในช่วง 5 ปีแรก ค่อนข้างสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน แต่ช่วงหลังจาก 5 ปี ที่คอนกรีตแช่น้ำทะเลพบว่า คอนกรีตทั้งสองกลุ่มมีอัตราการเพิ่มของความลึกที่คลอไรด์แทรกซึมค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังนั้นความแตกต่างของความลึกที่คลอไรด์แทรกซึมในระยะยาวส่วนใหญ่ได้รับอิทธิพลมาจากความแตกต่างของความลึกในช่วงก่อน 7 ปี ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผลของเถ้าถ่านหินต่อการต้านทานปริมาณคลอไรด์จะค่อนข้างชัดเจนมากในช่วง 5 ปีแรก โดยส่งผลให้ความลึกของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินลดลงจากกลุ่มที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากในช่วง 5 ปีแรก ปฏิกิริยาปอซโซลานในกลุ่มคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีผลชัดเจนต่อการพัฒนาโพรงภายในคอนกรีต และส่งผลให้คอนกรีตเกิดความแตกต่างระหว่างช่องว่างในโพรงของกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินและคอนกรีตธรรมดาค่อนข้างชัดเจน ตลอดจนความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ที่สูงขึ้นในกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินจึงส่งผลให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ลดลงค่อนข้างชัดเจนเมื่อเทียบกับกลุ่มคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน ส่วนกรณีที่อัตราการเพิ่มของความลึกที่คลอไรด์แทรกซึมลดลงในช่วง 5 ปี หลังจากคอนกรีตแช่น้ำทะเล และมีอัตราการเพิ่มที่ใกล้เคียงกันในคอนกรีตที่ผสมและไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน อาจมีผลจากระยะเวลาที่นานขึ้นเกลือคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปมีความลึกมากขึ้น ทำให้การเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์อิสระที่อยู่ในโพรงของคอนกรีตที่ได้รับอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อมภายนอกลดลง



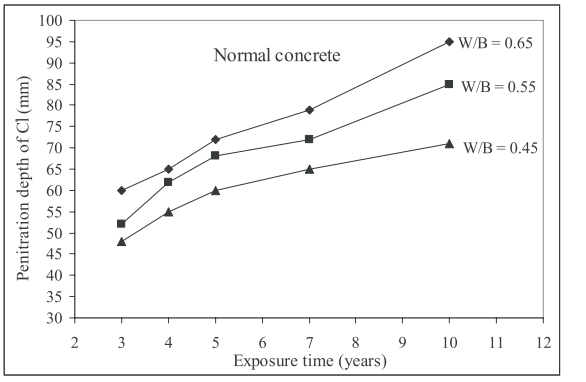

**รูปที่ 3** ผลของเถ้าถ่านหินต่อความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และ 0.65 ดังรูปที่ 2(ข) และ 2(ค) ตามลำดับ พบว่าความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาแช่น้ำทะเล โดยการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้น ก็ยังส่งผลต่อการลดความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ลงได้อย่างชัดเจน เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 (รูปที่ 2 (ค)) และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุ 10 ปี เท่ากับ 95, 79, 67, 59 และ 55 มม. ตามลำดับ

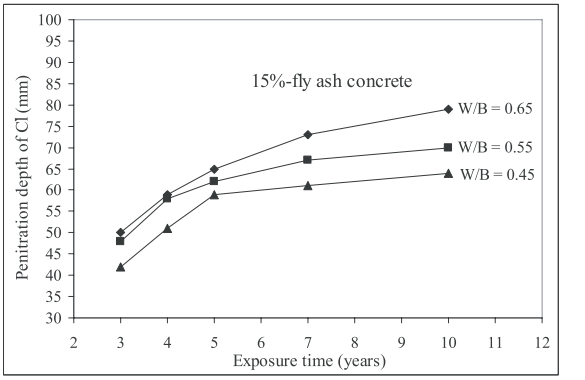
ผลของเถ้าถ่านหินต่อความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์แสดงได้ชัดเจนมากขึ้นดังรูปที่ 3 ซึ่งพบว่าการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลต่อการลดความลึกของคลอไรด์ที่แทรกซึมได้ชัดเจนมากขึ้น โดยแสดงผลชัดเจนในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงมากกว่ากลุ่มที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ

### 3.3 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์

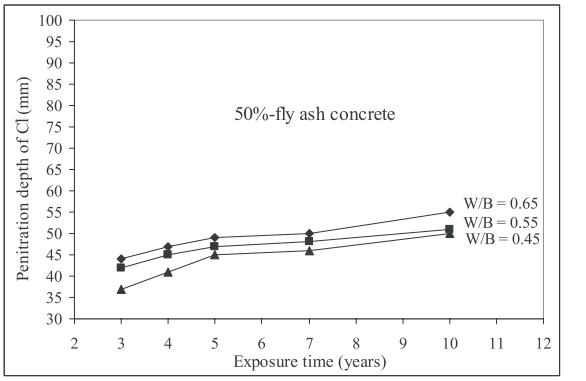
เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ ดังรูปที่ 4 พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการลดความลึก




ก) คอนกรีตธรรมดา




ข) คอนกรีตผสมเถ้าหินร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน




ค) คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

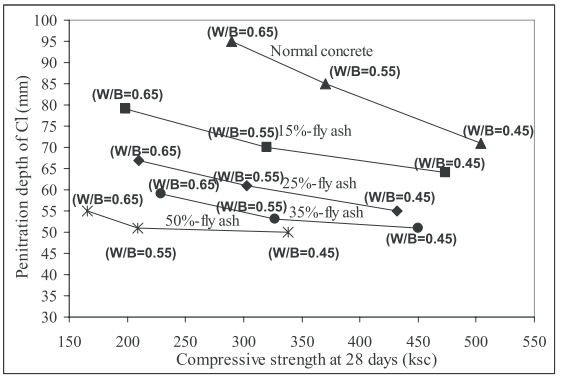
**รูปที่ 4** ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต

ของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาชัดเจนกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน โดยเมื่อใช้เถ้าถ่านหินผสมคอนกรีตในปริมาณที่สูง พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง มีผลทำให้ลดความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ได้น้อยลงเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณต่ำ โดยแสดงได้ชัดเจนในรูปที่ 4(ก), 4(ข) และ 4(ค) ที่พบว่า การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลงจาก 0.65 เป็น 0.45 ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15 และ 50 ส่งผลให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์มีค่าลดลงเท่ากับ 24, 15 และ 7 มม. หลังที่คอนกรีตแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี ตามลำดับ

การที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการลดลงของความลึกที่คลอไรด์แทรกซึมในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เป็นผลจากคุณสมบัติเชิงกลและความคงทนของคอนกรีตธรรมดา ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตเป็นหลัก ไม่ว่าจะเป็นกำลังอัดของคอนกรีต และความทึบน้ำในคอนกรีต เป็นต้น ขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่นอกเหนือจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เช่น คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าถ่านหินที่ส่งผลต่อความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน [16] และส่งผลให้คอนกรีตสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน กับความลึกของคลอไรด์ที่แทรกซึมในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่ากำลังอัดคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตลดลง โดยส่งผลชัดเจนในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน และการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น พบว่าการเพิ่มกำลังอัดก็ยิ่งมีอิทธิพลต่อการลดลงของความลึกของคลอไรด์ที่แทรกซึมในคอนกรีตน้อยลง

จากรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาถึงส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสมเพื่อใช้ก่อสร้างในสภาพแวดล้อมทะเล โดย




**รูปที่ 5** ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน กับความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี

พิจารณาจากกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันที่ควรจะสูงกว่า 350 กก/ซม$^2$ (ตามที่ ACI 201.2R แนะนำ) และความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุ 10 ปี หลังแช่น้ำทะเลควรต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 พบว่าส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสมในการใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเลควรเป็นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 ถึง 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

## 4. สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์มีอัตราการเพิ่มที่สูงในช่วง 5 ปีแรกที่คอนกรีตแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล หลังจากนั้นพบว่ามีอัตราการเพิ่มที่ต่ำ

2. การแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ลดลงอย่างชัดเจน

3. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลงส่งผลต่อการลดความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน

4. เมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงมีผลทำให้ลดความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ได้น้อยลง

5. กำลังอัดคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการลดความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน โดยการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น การเพิ่มกำลังอัดก็ยิ่งมีอิทธิพลต่อการลดความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ได้น้อยลง

6. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีความเหมาะสมในการใช้ป้องกันการกัดกร่อนในคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสสิ่งแวดล้อมทะเล เนื่องจากมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงกว่า 350 กก/ซม$^2$ ควบคู่กับความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 62 / 2553

## เอกสารอ้างอิง

[1] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, *ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต*, พิมพ์ครั้งที่ 6, สมาคมคอนกรีตไทย, 2553, หน้า 234-246.

[2] MDA. Thomas, JD. Matthews, “Performance of pfa concrete in a marine environment-10-year results,” *Cem Concr Compos*, vol.26, pp. 5-20, 2004.

[3] S. Rukzon and P. Chindaprasirt, “Strength and chloride resistance of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash and fly ash,” *Inter J Minera Metallu Mater*, vol.16, pp. 475-481, 2009.

[4] P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, and T. Sinsiri, “Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste,” *Cem Concr Compos*, vol. 27, pp. 425-428, 2005.

[5] W. Chalee, M. Teekavanit, K. Kiattikomol, A. Siripanichgorn, and C. Jaturapitakkul, “Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment,” *Constr Build Mater*, vol.21, pp. 965-971, 2007.

[6] W. Chalee, P. Ausapanit, and C. Jaturapitakkul, “Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis,” *Mater Design*, vol.31, pp.1242-1249, 2010.

[7] *ASTM. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, C618-03*, Annual Book of ASTM Standards 04.02, 2003.

[8] *ACI. Guide for Use of Normal Weight Aggregates in Concrete, ACI 221R-89*, ACI Manual of Concrete Practice Part 1, 1992, Detroit, pp. 4.

[9] *ASTM. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate, C127-88*, Annual Book of ASTM Standards 04.02.-2001.

[10] *ASTM. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, C128-93*, Annual Book of ASTM Standards 04.02.-2001.

[11] สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา, “การศึกษาคุณภาพน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออก,” มิถุนายน 2537, หน้า 55.

[12] *ASTM C1218. Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete*, Annual Book of ASTM Standards, 04.01, 1999.

[13] G. Van Der Wegen, J. Bijen,and R. Van Selst, “Behavior of concrete affected by sea water under high pressure,” *Mater Struct*, vol.26, pp. 549-556, 1993.

[14] T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul, W. Chalee,

"Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment," *Constr Build Mater*, vol. 24, pp. 1352-1357, 2010.

[15] M.Thomas, "Chloride threshold in marine concrete," *Cem Concr Res*, vol. 26, pp. 513-519, 1996.

[16] W. Chalee and C. Jaturapitakkul, "Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment," *Mater Struct*, vol. 42, pp. 505-514, 2009.