



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

ความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินภายใต้

สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

(Durability of recycle aggregate concrete containing fly ash under 5-year exposure in marine site)

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 352186

สัญญาเลขที่ 106/2560

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

ความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินภายใต้
สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

(Durability of recycle aggregate concrete containing fly ash under 5-year
exposure in marine site)

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาติ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

พฤษภาคม 2561

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งรองศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “ความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี” จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มีงบประมาณทั้งโครงการ 475,000 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ	:	นายวิเชียร ชาลี
หน่วยงาน	:	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ	:	12 เดือน
งบประมาณ	:	475,000 บาท

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ การกักกร่อนเหล็กเสริม และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี โดยใช้เถ้าถ่านหินจากแม่เกาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม³ และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ให้มีระยะหุ้มของคอนกรีตหนาเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. เพื่อทดสอบการกักกร่อนเหล็กเสริมและการแทรกซึมของคลอไรด์ ตลอดจนหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 100x200 มม². เพื่อทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 28 วัน นำตัวอย่างทดสอบไปแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งในสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยเก็บตัวอย่างทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ การกักกร่อนเหล็กเสริมและกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี

ผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตทุกส่วนผสม มีการสูญเสียกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตและการกักกร่อนเหล็กเสริมลงได้อย่างชัดเจน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงส่งผลต่อการลดการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน การศึกษาครั้งนี้พบว่า การแทนที่เถ้าถ่านหินแม่เกาะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีความเหมาะสมทั้งกำลังอัดและความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่จะใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล

คำสำคัญ : มวลรวมจากเศษคอนกรีต, เถ้าถ่านหิน, การแทรกซึมคลอไรด์, กำลังอัด, การกักกร่อนเหล็ก, สิ่งแวดล้อมทะเล

Abstract

The objectives of this investigation were to study the effect of W/B ratios and fly ash contents on chloride penetration, steel corrosion and compressive strength of recycled aggregate concrete under 5-year exposure in marine environment. Fly ash from MaeMoh power plant was used as a partial replacement of portland cement type I at 0, 15, 25, 35, and 50% by weight of binder. Water to binder ratios (W/B) was varied as 0.40, 0.45, and 0.50. Concrete cube specimens of $200 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$ were cast and steel bars of 12-mm in diameter and 50-mm in length are embedded at coverings of 10, 20, 50, and 75 mm. Besides, the cylindrical specimens of 100-mm in diameter and 200-mm in height were cast for compressive strength test. Subsequently, the hardened concrete specimens were cured in fresh water until the age of 28 days and then were exposed to tidal zone of marine environment. The specimens were tested for chloride penetration, steel corrosion and compressive strength in concrete after being exposed to the tidal zone for 5 years.

The results showed that all recycle aggregated concrete show strength loss after 5-year exposure in marine site. The increase of fly ash replacement in concrete clearly reduced the chloride penetration and steel corrosion in recycled aggregate concrete. When the W/B ratio of concrete was reduced, the decrease of chloride penetration in concrete without fly ash was higher than that of the fly ash concrete. This study was found that the use of Mae-Moh fly ash to replace Portland cement between 15 and 25 percent by weight of binder with the W/B ratio of 0.40 in the mixture would be suggested to satisfy both compressive strength and chloride penetration resistance of recycled aggregate concretes exposed to marine environment.

Keywords: Recycled aggregate, Fly ash, Chloride penetration, Compressive strength, Steel corrosion, Marine environment

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 106/2560

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูล เพื่อส่งเสริมการใช้งานคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยใช้เถาถ่านหินในการปรับปรุงสมบัติด้านความคงทน ให้สามารถก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเลได้อย่างเป็นรูปธรรมมากขึ้น

สารบัญ

สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญเนื้อหา	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การรีไซเคิลเศษปูนและกากคอนกรีต	4
2.2 คุณภาพของเศษคอนกรีตเก่า	5
2.3 ผลกระทบของน้ำทะเลต่อคอนกรีต	9
2.4 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์	10
2.5 ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต	13
2.6 ผลกระทบของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก	13
2.7 ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็ก	15
2.8 การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต	16
2.9 วัสดุปอชโซลาน	17
2.10 ปฏิกริยาปอชโซลาน	18
2.11 เถ้าถ่านหิน	18
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22

สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	24
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	24
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	24
3.3 วิธีการทดสอบและเตรียมตัวอย่างทดสอบ	26
3.4 วิธีการทดสอบ	30
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	40
4.1 สมบัติของวัสดุประสาน	40
4.2 สมบัติของมวลรวมจากเศษคอนกรีต	43
4.3 สมบัติของน้ำทะเล	44
4.4 สภาพผิวหน้าของคอนกรีต	45
4.5 กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต	46
4.6 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต	47
4.7 การกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต	60
4.8 ผลของเถ้านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต ที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมธรรมชาติภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 5 ปี	63
4.9 โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน ที่แช่ ในสภาวะแวดล้อมทะเล	73
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	76
5.1 สรุปผล	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	77
เอกสารอ้างอิง	78
ภาคผนวก ก ผลผลิต (Output)	83
ภาคผนวก ข รายงานการเงิน	95
ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย	97

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การดูดซึมน้ำของมวลรวมจากเศษคอนกรีตของงานวิจัยที่ผ่านมา	6
2.2 ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ผิวของมวลรวมหยาบ	7
4.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน	42
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน	43
4.3 สมบัติของมวลรวม	44
4.4 สมบัติของน้ำทะเลบริเวณ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	45
4.5 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมแก้่านหินและใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่อายุ 28 วัน	47
4.6 ร้อยละพื้นที่สนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะ 10 , 20 , 50 และ 75 มม.	61
4.7 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติที่อายุ 28 วันและหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี	66
4.8 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D _c) ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี	72

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต	11
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	26
3.2 การฝังเหล็กเสริมลงในคอนกรีต	30
3.3 ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล	30
3.4 การเจาะตัวอย่างคอนกรีต	31
3.5 การตัดตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะ	32
3.6 การบดตัวอย่างเพื่อทดสอบคลอไรด์	32
3.7 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย	36
3.8 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย	38
3.9 การวัดการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีต	39
4.1 ภาพถ่ายขยายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	41
4.2 ภาพขยายอนุภาคของเถ้านหินแม่เมาะ	41
4.3 ขนาดผลของมวลรวมจากเศษคอนกรีต	44
4.4 สภาพผิวคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี	46
4.5 ผลของเถ้านหินต่อการแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 5 ปี	50
4.6 ผลของเถ้านหินต่อปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี	51
4.7 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี	54
4.8 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี	56
4.9 ผลของเถ้านหินต่อปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ตำแหน่งเหล็กเสริมหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี	59
4.10 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ตำแหน่งเหล็กเสริมที่ฝังที่ระยะ 10 มม. หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี	59
4.11 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ตำแหน่งเหล็กเสริมที่ฝังที่ระยะ 50 มม. หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี	60

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
4.12 การกัดกร่อนเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้ม 50 มม. หลังจากแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นระยะเวลา 5 ปี	62
4.13 การกัดกร่อนเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้ม 75 มม. หลังจากแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นระยะเวลา 5 ปี	63
4.14 ผลของเถาถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ	67
4.15 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี	70
4.16 การหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี	72
4.17 ผลของเถาถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี	73
4.18 ภาพขยาย Scanning Eletron Microscopy (SEM) ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มี W/B = 0.40 หลังแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล	75



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

ความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินภายใต้

สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

(Durability of recycle aggregate concrete containing fly ash under 5-year exposure in marine site)

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยบูรพา

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การรีไซเคิลเศษปูนและกากคอนกรีต

ปัจจุบันอุตสาหกรรมเกี่ยวกับผลิตคอนกรีตมีจำนวนมาก กระจายตัวตามพื้นที่ต่างๆ ทั่วประเทศ ซึ่งต้องใช้วัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตสำเร็จเป็นจำนวนมาก เช่น หินกรวด ทรายปูนซีเมนต์ การผลิตปูนซีเมนต์สำเร็จดังกล่าวได้มีการกำหนดปริมาณปูนสำเร็จมากกว่าปริมาณที่ออกแบบไว้ เพื่อเป็นการรองรับปัญหาที่จะเกิดขึ้นกรณีเมื่อปูนไม่พอกับแบบการก่อสร้าง ส่วนที่เหลือจากการผลิตปูนดังกล่าวผู้ประกอบการได้นำเศษปูนไปถมที่ ซึ่งยังไม่มีมูลค่าและยังไม่เกิดประโยชน์เท่าที่ควร ดังนั้นการหาแนวทางในการเพิ่มมูลค่าจากเศษปูนที่เหลือจากการผลิตจึงเป็นทางออกที่คาดว่าจะเกิดประโยชน์สูงสุดทั้งในด้านการลดปริมาณของเสียและการลดปัญหาการใช้ทรัพยากรอย่างสิ้นเปลือง (ประจักษ์ เข้มบุบผา, 2548)

2.1.1 คอนกรีต

คอนกรีต คือ วัสดุผสมที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ปูนซีเมนต์ วัสดุผสม (เช่น หิน ทราย หรือ กรวด) และ น้ำ โดยอาจจะมีสารเคมีเติมเพิ่มเข้าไปสำหรับคุณสมบัติด้านอื่น เมื่อผสมเสร็จคอนกรีตจะแข็งตัวอย่างช้าๆ ซึ่งน้ำและซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกันในลักษณะที่เรียกว่าการไฮเดรชัน โดยซีเมนต์จะเริ่มจับตัวกับวัสดุอื่นและแข็งตัว ซึ่งในสถานะนี้จะนิยมเรียกกันว่าคอนกรีต ความแข็งแรงของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆหลังจากที่ผสม และยังแข็งแรงขึ้นภายหลังจากการแข็งตัว โดยประมาณหลังจากแข็งตัวแล้ว 28 วัน ความแข็งแรงจะเริ่มคงที่

2.1.2 กระบวนการผลิตคอนกรีต

การผสมคอนกรีตสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น การผสมด้วยเครื่องผสมคอนกรีต /การผสมด้วยมือ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ในงานขนาดเล็กและมีพื้นที่ที่สามารถผสมคอนกรีตที่หน้างานได้ ส่วนในกรณีงานก่อสร้างเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่อาจต้องใช้คอนกรีตผสมเสร็จ ซึ่งกระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่มีมาตรฐาน จะเริ่มจากการตรวจสอบคุณสมบัติของส่วนผสมต่างๆ อันได้แก่ หิน ทราย ที่ได้จากแหล่งที่มีคุณภาพดี มีส่วนคละถูกต้องตามมาตรฐาน มาจัดกองเก็บไม่ให้ผสมกัน ส่วนปูนซีเมนต์จะถูกบรรจุไว้ในไซโลอย่างมิดชิด และน้ำยาผสมคอนกรีตจะถูกบรรจุในภาชนะเฉพาะอย่างมิดชิดเช่นกัน วัตถุดิบดังกล่าวจะถูกลำเลียงเข้าสู่ขบวนการผลิตต่อไปกระบวนการผลิตเริ่มจาก การลำเลียงหิน ทราย ปูนซีเมนต์ และสารผสมอื่นๆ เช่น เถ้าถ่านหิน ผ่านเครื่องชั่งให้น้ำหนักถูกต้องตามที่ออกแบบไว้ โดย

ในขั้นตอนนี้จะต้องคำนึงถึงสภาพความชื้นของหินทรายด้วย เพราะหินทรายอาจไม่อยู่ในสภาพที่ ออกแบบหรือสภาพอึดตัว ผิวแห้ง ซึ่งจะต้องปรับน้ำหนักหินทรายและน้ำให้ถูกต้อง ส่วนน้ำและน้ำยา ผสมคอนกรีตจะผ่านเครื่องชั่งหรือวัดปริมาตร แล้วนำเข้ามาผสมกันในเครื่องผสมคอนกรีต ซึ่งจะต้อง ผสมคอนกรีตตามเวลาที่กำหนด ให้มีความเที่ยงตรง สม่ำเสมอและรวดเร็ว คอนกรีตที่ผสมเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะถูกลำเลียงลงสู่รถผสมคอนกรีตเพื่อนำไปส่งยังหน่วยงานก่อสร้าง

2.1.3 การเพิ่มมูลค่าเศษคอนกรีต (ปกป้อง รัตนชู, 2551)

2.1.3.1.1 การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีต (Concrete Products)

การแปรรูปผลิตภัณฑ์คอนกรีตเป็นการนำคอนกรีตสดที่มีคุณสมบัติคืออยู่ผลิตเป็นคอนกรีต สำเร็จรูป (Concrete Products) เช่น แผ่นคอนกรีตปูพื้นอิฐบล็อก เป็นต้น

2.1.3.1.2 การคัดแยกวัสดุคิบบอกจากคอนกรีตสดเพื่อนำไปใช้งานใหม่ (Recycling Aggregate)

การคัดแยกวัสดุคิบบอกจากคอนกรีตสดเพื่อนำไปใช้งานใหม่เป็นการคัดแยกคอนกรีตสดที่เหลือ จากการผลิตออกเป็นวัสดุคิบบที่สะอาด เพื่อให้สามารถนำมาใช้งานใหม่ เช่น หิน ทราย และน้ำปูน เป็น เศษคอนกรีตสดที่ยังไม่แข็งตัวมาทำการล้างทำความสะอาด ทำการคัดแยก หินกรวดและทราย เพื่อนำมา เป็นวัสดุคิบบในการผสมคอนกรีตใหม่ ส่วนน้ำปูนที่เหลือจะนำมาเป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตใหม่ เช่นกัน

2.1.3.3 การใช้เศษคอนกรีตเป็นวัสดุคิบบมวลรวม

การใช้เศษคอนกรีตเป็นวัสดุคิบบมวลรวมเป็นการนำเศษคอนกรีตแข็งตัวแล้วมาเป็นมวลรวม (หิน ทราย) ทดแทนจากแหล่งธรรมชาติโดยนำคอนกรีตที่เหลือจากการผลิตที่แข็งตัวแล้วนำมาบดย่อยให้มี ขนาดเล็กลงเพื่อเป็นวัสดุคิบบทดแทน หิน ทราย ที่มาจากแหล่งธรรมชาติ

โดยสรุปแล้วแนวทางการเพิ่มมูลค่าของเศษคอนกรีตข้างต้นเป็นการหาแนวทางในการจัดการ เศษคอนกรีตที่เหลือจากการก่อสร้าง เป็นการลดปริมาณการขออนุญาตทิ้งกากของเสียเหลือใช้และเป็น การลดการใช้ทรัพยากรอีกทางหนึ่ง ซึ่งวิธีการจัดการเศษกากคอนกรีตมีหลากหลายวิธี โดยวิธีต่างๆ ดังกล่าว เป็นแนวทางที่เหมาะสมอีกวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาการกำจัดเศษกากคอนกรีตและการใช้ ทรัพยากรอย่างสิ้นเปลือง (ปกป้อง รัตนชู, 2551)

2.2 คุณภาพของเศษคอนกรีตเก่า

เศษคอนกรีตเก่า และ เศษอิฐหักเป็นสิ่งที่ได้จากการทุบหรือระเบิดเพื่อทำลายอาคารและ โครงสร้างต่างๆ โดยทั่วไปคอนกรีตที่ได้จากการทำลายอาคาร และ โครงสร้างต่างๆจะมีสิ่งปนเปื้อน เช่น เหล็กเส้น เศษอิฐ ไม้พลาสติก และ แก้ว ในบางกรณีอาจมีการปนเปื้อนของคลอไรด์และซัลเฟตด้วย ใน ปัจจุบันการใช้เศษคอนกรีตเก่าแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติมีปริมาณเพิ่มขึ้นเนื่องจากมวลรวมจาก

ธรรมชาติมีปริมาณลดลง และ การกำจัดคอนกรีตที่ได้จากการทำลายอาคาร และ โครงสร้างต่างๆก็ทำได้ยาก ดังนั้นการนำเศษคอนกรีตเก่ามาใช้เพื่อทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติให้ได้ผลดีจึงต้องทำการศึกษาคูณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ขนาดกะห่วยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ ความต้านทานการสึกกร่อน และ ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เกาะที่ผิวของมวลรวม

2.2.1 หน่วยน้ำหนัก

Hansen, T.C. and Narud, H., (1983) ได้หาความหนาแน่นของมวลรวมหยาบที่ได้จากเศษคอนกรีตเก่าในสภาวะอิมตัวผิวแห้งมีค่าประมาณ 2340 - 2490 กก./ม.³ โดยขึ้นอยู่กับคุณภาพของเศษคอนกรีตเก่า นอกจากนี้ Hasaba, S., Kawamura, M. and Toriik, K, (1981) ทำการศึกษาเรื่องดังกล่าวและได้ผลเช่นเดียวกันและยังพบว่าความหนาแน่นของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 5 มม. ที่ได้จากเศษคอนกรีตเก่าในสภาวะอิมตัวผิวแห้งมีค่าประมาณ 2430 กก./ม.³ และ 2310 กก./ม.³ ตามลำดับ ซึ่ง Narud, H., (1981) พบว่าความหนาแน่นของมวลรวมละเอียดที่ได้จากเศษคอนกรีตเก่าในสภาวะอิมตัวผิวแห้งมีค่าประมาณ 2279 กก./ม.³ ในกรณีที่เศษคอนกรีตเก่าได้จากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.70 และ Ravindrarajah, R.S. and Tam, T.C., (1985) สรุปว่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมที่ได้จากเศษคอนกรีตเก่า

2.2.2 การดูดซึมน้ำ

โดยทั่วไปเศษคอนกรีตเก่าที่นำมาใช้แทนมวลรวมมีอัตราการดูดซึมน้ำสูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติประมาณ 3 ถึง 12 เท่าโดยขึ้นอยู่กับขนาดกะห่วยของมวลรวมแสดงดัง ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การดูดซึมน้ำของมวลรวมจากเศษคอนกรีตของงานวิจัยที่ผ่านมา

References	Water Absorption (%)			
	Recycled Concrete Aggregate		Natural Aggregate	
	Coarse	Fine	Coarse	Fine
Kikuchi et al., 1988	4.0-5.7	7.3-10.0	0.5-1.6	1.2
Kakizaki et al., 1988	3.5-6.3	9.4-11.8	1.4	3.3
Mukai et al., 1978	6.7	9.4	0.8	1
Hansen and Marga, 1992	3.3-10.0	11.4-13.1	0.6-1.1	2.4
Ravindrajah and Tam, 1985	5.7	6.2	0.3	0.6
Hansen and Narud, 1983	3.8-5.0	8.7	0.8-1.8	3.7
Hasaba et al., 1981	7	11	-	-
B.C.S.J., 1978	3.6-8.0	8.3-12.1	-	-

จากการศึกษาของ สมาคมผู้รับเหมาของญี่ปุ่น (B.C.S.J., 1978) พบว่าเศษคอนกรีตเก่าที่นำมาใช้ทดแทนมวลรวมควรมีอัตราการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 7 และ 13 ในกรณีเป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ตามลำดับ นอกจากนี้ Hansen and Marga, (1992) ให้คำแนะนำว่า การทดสอบหาการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตเก่าโดยใช้วิธีตามมาตรฐาน ASTM C 128 ไม่เหมาะสมเพราะมีความคลาดเคลื่อนมากในสภาวะอิมั้วแห้งเนื่องจากมวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตเก่ายึดเกาะกันแน่น

2.2.3 ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ผิวของมวลรวมหยาบ

เศษคอนกรีตเก่าประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ มวลรวมจากธรรมชาติและ ซีเมนต์เพสต์ที่เกาะอยู่ที่ผิวของมวลรวม ซีเมนต์เพสต์ที่ผิวของมวลรวมจะส่งผลต่อลักษณะของมวลรวม คือผิวของมวลรวมมีความพรุนจึงทำให้มีการดูดซึมน้ำสูงส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด และ คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการหาปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เกาะที่ผิวของมวลรวมโดยใช้วิธี Linear Transverse Method ตามมาตรฐาน ASTM C 457 หรือการแช่มวลรวมในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เพื่อหาปริมาณซีเมนต์เพสต์เกาะที่ผิวของมวลรวม ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ผิวของมวลรวมหยาบ

References	Attached Cement Content (%)	
	Coarse Recycled Aggregate	Fine Recycled Aggregate
Hansen and Narud, 1983	25-39	58-64
Ravindrajah and Tam, 1985	20	-
Sayamipak, 1995	40	-

Hansen and Narud, (1983) พบว่าซีเมนต์เพสต์เกาะที่ผิวของมวลรวมหยาบมีปริมาณร้อยละ 25-35 สำหรับเศษคอนกรีตเก่าที่มีขนาด 16-32 มม. เศษคอนกรีตเก่าที่มีขนาด 8-16 มม. มีปริมาณซีเมนต์เพสต์เกาะที่ผิวร้อยละ 40 เศษคอนกรีตเก่าที่มีขนาด 4-8 มม. มีปริมาณซีเมนต์เพสต์เกาะที่ผิวร้อยละ 60 ส่วน Hasaba et al., (1981) พบว่า ซีเมนต์เพสต์เกาะที่ผิวของมวลรวมหยาบมีปริมาณร้อยละ 35.5 สำหรับเศษคอนกรีตเก่าขนาด 5-25 มม. ที่ได้จากคอนกรีตที่มีกำลังอัด 24 เมกะปาสกาล ร้อยละ 36.7 สำหรับเศษคอนกรีตเก่าได้จากคอนกรีตที่มีกำลังอัด 41 เมกะปาสกาล และ ร้อยละ 38.4 สำหรับเศษคอนกรีตเก่าที่ได้จากคอนกรีตที่มีกำลังอัด 51 เมกะปาสกาล และ สมาคมผู้รับเหมาของญี่ปุ่น B.S.C.J.,(1977) พบว่า

ปริมาณซีเมนต์เพสต์เกาะที่ผิวของมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่าหาได้จากการนำมวลรวมหยาบแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสหลังจากนั้นหาปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เกาะผิวของมวลรวมหยาบโดยการวัดการสูญเสียน้ำหนักของมวลรวมหยาบ

2.2.4 ความต้านทานการสึกกร่อน

ค่าความต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบที่ทดสอบโดยเครื่องทดสอบลอสแอนเจลีส์เป็นค่าที่บอกถึงคุณภาพของมวลรวมหยาบในการต้านทานการสึกกร่อนและการกระแทกจากมาตรฐาน ASTM C 33 มวลรวมหยาบที่ใช้งานคอนกรีตทั่วไปเมื่อผ่านการทดสอบโดยเครื่องลอสแอนเจลีส์แล้วจะต้องมีส่วนสึกกร่อนไปไม่เกินร้อยละ 50 และสำหรับงานถนนต้องไม่เกินร้อยละ 40 Hansen, T.C. and Narud, H., (1983) พบว่าการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่าโดยทดสอบจากเครื่องทดสอบลอสแอนเจลีส์มีค่าประมาณร้อยละ 22.4 สำหรับเศษคอนกรีตเก่าขนาด 16-32 มม. ที่ได้จากคอนกรีตที่มีกำลังสูง และ ร้อยละ 41 สำหรับเศษคอนกรีตเก่าขนาด 4-8 มม. ที่ได้จากคอนกรีตที่มีกำลังต่ำ ขณะที่สมาคมผู้รับเหมาของญี่ปุ่น B.S.C.J., (1977) พบว่าการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่าโดยทดสอบจากเครื่องทดสอบลอสแอนเจลีส์มีค่าร้อยละ 25.1 ถึง 35.1 ส่วน Yoshikane, T., (1995) พบว่าการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่า โดยทดสอบจากเครื่องทดสอบลอสแอนเจลีส์มีค่าประมาณร้อยละ 20.4 สำหรับเศษคอนกรีตเก่าขนาด 5-13 มม. ที่ได้จากคอนกรีตที่มีกำลังสูง และ ร้อยละ 28.7 สำหรับเศษคอนกรีตเก่าที่ได้จากคอนกรีตที่มีกำลังต่ำ

2.2.5 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเก่า

2.2.5.1 กำลังอัดและการพัฒนากำลัง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา L.Ch., (1991) พบว่าการใช้เศษคอนกรีตเก่าแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติไม่เกินร้อยละ 30 จะส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตใหม่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมโดยใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ และ Buck, A.D., (1973) พบว่าการใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยคอนกรีตที่มีกำลังต่ำมาทำคอนกรีตไม่ส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตมากนักแต่การใช้สารลดน้ำเพื่อลดปริมาณความต้องการน้ำจะส่งผลต่อกำลังอัดมากกว่า โดยที่ Kasai, Y., and Fujii, T., (1989) ; Ravindrarajah, R.S. and Tam, T.C., (1985) และ สมาคมผู้รับเหมาของญี่ปุ่น B.S.C.J., (1977) พบว่ากำลังของคอนกรีตที่นำมาทำมวลรวมจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตใหม่ ได้แก่ ความพรุนความทนทาน การใช้เศษคอนกรีตเก่าแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติร้อยละ 20 ไม่ส่งผลต่อกำลังอัด การใช้เศษคอนกรีตเก่าแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติร้อยละ 100 จะทำให้กำลังอัดลดลงร้อยละ 8-40 ขณะที่ Rasheeduzzafar, and Khan, A., (1984) ได้พยายามทำคอนกรีตกำลังสูงขนาด 40 เมกะปาสกาลโดยใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่าที่ได้จากคอนกรีตที่มีกำลังอัดปานกลาง (23 เมกะปาสกาล) พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ เมื่อใช้อัตราส่วน

น้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากัน ส่วน Soshiroda, T., (1983) พบว่าการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่าและทราย มีลักษณะคล้ายกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ และสรุปว่าการใช้มวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตเก่าแทนที่ทรายจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง และมีการซึมผ่านเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติความคงทนของคอนกรีต

2.3 ผลกระทบของน้ำทะเลต่อคอนกรีต

ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล เกิดจากสาเหตุทางกายภาพโดยได้รับแรงกระทำจากคลื่น ทราย กรวด ซึ่งส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนบริเวณผิวหน้าคอนกรีต รวมไปถึงความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ส่วนสาเหตุจากกระบวนการทางเคมีจะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบเคมีต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล ซึ่งจะมีความรุนแรงแตกต่างกันไปตามประเภทของสารเคมี

ความเสียหายและความรุนแรงของการกัดกร่อนต่อคอนกรีตอาจไม่เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งจะมีความเสียหายสูง เพราะบริเวณดังกล่าวมีการขัดสีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตทั้งจากแรงกระทำของคลื่น ทิศทางลม อุณหภูมิ ความชื้น ระยะเวลาที่โครงสร้างอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง การไหลเวียนของน้ำทะเล นอกจากนี้ คอนกรีตที่สภาวะเปียกสลับแห้งมีการสะสมสารเคมีทั้งซัลเฟต คลอไรด์ และเกลือต่างๆ ในช่องว่างของคอนกรีต ทำให้มีความเข้มข้นสูงกว่าปกติ จึงเกิดการกัดกร่อนที่รวดเร็ว ในกรณีที่มีรอยแตกร้าวเล็ก ๆ ซึ่งเกิดจากการหดตัวเนื่องจากความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะยิ่งทำให้คอนกรีตมีความเสียหายรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยทั่วไปลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล สามารถแบ่ง ได้ 5 บริเวณ ดังนี้

2.3.1 บริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric Zone) คอนกรีตบริเวณนี้ไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง แต่จะสัมผัสกับละอองน้ำทะเลที่ลมพัดมา อากาศที่มีไอเกลือจากน้ำทะเลเจือปน ความเข้มข้นของเกลือจะลดลงตามระยะห่างจากน้ำทะเล โดยขึ้นอยู่กับสภาพทางธรรมชาติของชายฝั่งทะเล ทิศทางและความแรงของกระแสลมที่จะพัดพาละอองไอเกลือ แม้โครงสร้างที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลเข้ามาหลายกิโลเมตรก็ยังมีโอกาสได้รับเกลือจากน้ำทะเลได้ ความเสียหายของคอนกรีตในบริเวณนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม การผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ โดยอาจเริ่มจากมีรอยแตกร้าวขนาดเล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้ง่ายขึ้น

2.3.2 บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่เหนือระดับน้ำขึ้นสูงสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะเปียกน้ำเมื่อสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล เมื่ออยู่ในสภาพแห้งในช่วงน้ำลงความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้จะเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์ค่อนข้างรุนแรง เนื่องจากในสภาพที่คอนกรีตเปียกสลับแห้งทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้เร็วขึ้น ประกอบกับความชื้นและก๊าซออกซิเจนในช่องว่างสูงทำให้คอนกรีตเกิดสนิมได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้คอนกรีตยังเกิดความ

เสียหายได้จากการผุกร่อนเนื่องจากการตกผลึกของเกลือ การสึกกร่อนจากการกัดเซาะเนื่องจากแรงกระแทกของคลื่น คอนกรีตในบริเวณนี้มักพบว่าเกิดความเสียหายรุนแรงกว่าส่วนอื่น ๆ

2.3.3 บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างระดับน้ำขึ้นสูงสุดและน้ำลงต่ำสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะจมอยู่ใต้น้ำในช่วงเวลาน้ำขึ้น แต่ในช่วงเวลาน้ำลงคอนกรีตจะสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำ และบางส่วนจะแห้งคล้ายกับบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม การผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ การกัดเซาะจากคลื่นและกระแสน้ำ การกัดกร่อนจากทรายหรือกรวดที่ลอยอยู่ในน้ำทะเล การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิต

2.3.4 บริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged Zone) เป็นบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเลต่ำสุด คอนกรีตในบริเวณนี้จะแช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา ความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้เกิดจากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิตบางชนิด การเน่าเปื่อยทางชีวภาพ การเกิดสนิมในเหล็กเสริมจะพบได้น้อย เนื่องจากไม่มีก๊าซออกซิเจนเพียงพอที่ทำให้เกิดสนิม

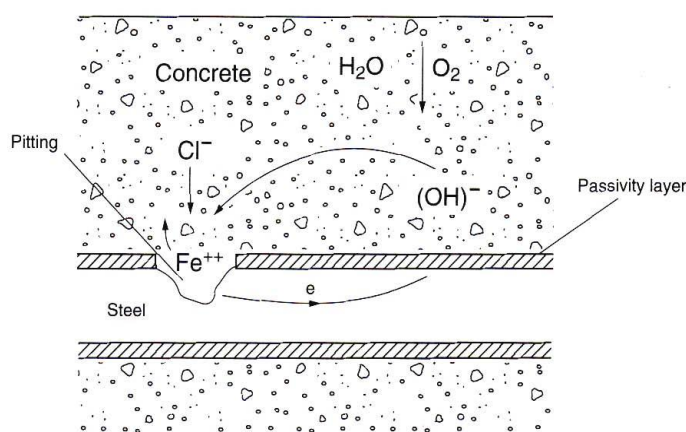
2.3.5 บริเวณใต้พื้นทะเล (Seabed Zone) เป็นบริเวณใต้พื้นทรายหรือพื้นดินใต้น้ำทะเล ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การเน่าเปื่อยทางชีวภาพ การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิตบางชนิด

การกัดกร่อนทางเคมีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตเกิดจากคลอไรด์และซัลเฟต ที่อยู่ในน้ำทะเล ซึ่งส่งผลต่อความทนทานของคอนกรีต สารละลายส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในน้ำทะเล ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl₂) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) แคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และโพแทสเซียมซัลเฟต (K₂SO₄) เป็นต้น ซึ่งน้ำทะเลแต่ละบริเวณมีความเข้มข้นของสารละลายเหล่านี้แตกต่างกัน เนื่องจากสภาพแวดล้อมทางภูมิศาสตร์และภูมิอากาศ โดยทั่วไปปริมาณผลรวมของสารละลายเกลือทั้งหมดมีค่าประมาณ 35 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังมีก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ในน้ำทะเลอีกด้วย ค่า pH ของน้ำทะเลอยู่ระหว่าง 7.5 ถึง 8.4 (Neville, 1996) การแทรกซึมของน้ำทะเลเข้าไปในคอนกรีตสามารถทำให้ค่า pH ของคอนกรีตลดลงเหลือ 12 ได้ (Gjorv and Vennesland, 1976)

2.4 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม และคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหาย เนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมและเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ลายของค่าอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก หลังการเกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชันจะเกิดผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งเกิดขึ้นนั่นคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่าง ทำให้ซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีความเป็นด่างสูง คือ มีค่า pH ประมาณ 12.5 ถึง 13.5 ความเป็นด่างของคอนกรีตจะช่วยป้องกันเหล็กเสริมภายในคอนกรีตไม่ให้เกิดสนิม โดยจะเกิดชั้นฟิล์มบาง ๆ

ของ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ ซึ่งสามารถป้องกันน้ำและก๊าซออกซิเจนไม่ให้มาทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริม จึงไม่เกิดสนิมขึ้น อย่างไรก็ตามอออนของคลอไรด์ก็สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ และเมื่อมีน้ำและออกซิเจนมาสัมผัสกับเหล็กเสริมบริเวณที่ไม่มีฟิล์มออกไซด์ปกป้องกันอยู่ เหล็กก็จะเป็นสนิม (แสดงดังรูปที่ 2.1)



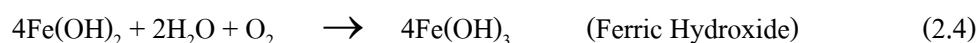
รูปที่ 2.1 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต (Neville, 1996)

ความเป็นต่างของคอนกรีตอาจลดลงได้จากหลายสาเหตุ การแทรกซึมของคลอไรด์ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่ง และหากค่าความเป็นต่างของคอนกรีตลดลงจนค่า pH ต่ำกว่า 9 หรือ 10 กลไกการเกิดสนิมเหล็กจะเกิดขึ้น เมื่อคลอไรด์จากน้ำทะเลสามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตจนถึงชั้นของเหล็กเสริมและทำลายชั้นฟิล์มดังกล่าว ประกอบกับมีน้ำหรือความชื้นและก๊าซออกซิเจนภายในคอนกรีต ทำให้กระบวนการเกิดสนิมจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้นในลักษณะของเซลล์กัลวานิก (Galvanic Cell) เนื่องจากเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวของเหล็กเสริม ซึ่งมีสาเหตุจากความแตกต่างของสภาพแวดล้อมของคอนกรีต ความแตกต่างของความชื้น ความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายเกลือภายในช่องว่างคอนกรีต ฯลฯ ทำให้เกิดสภาพขั้วบวกและขั้วลบ (Cathode and Anode) เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าโดยมีสารละลายของเกลือคลอไรด์ในช่องว่างคอนกรีตเป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ให้อิเลคตรอนวิ่งผ่าน

กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrolysis) ของกระบวนการเกิดสนิมจะเริ่มจากขั้วบวก (Anode) เหล็กจะแตกตัวเป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาพสารละลาย ดังสมการ(2.2) ส่วนอิเล็กตรอน (e^-) จะวิ่งผ่านไปตามเหล็กเสริมเข้าสู่ขั้วลบ (Cathode) โดยมีน้ำที่มีคลอไรด์ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า ปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic Reaction) จากนั้นอิเล็กตรอน (e^-) จากปฏิกิริยาแอโนดิกจะไปรวมตัวกับน้ำและก๊าซออกซิเจนจนเกิดเป็น ไฮดรอกซิดไอออน (OH^-) ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic Reaction) ดังสมการ (2.5) และเมื่อ Fe^{2+} รวมตัวกับ OH^- จะเกิดเป็น

เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) ดังสมการ (2.3) และเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนเกิดเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) หรือสนิมเหล็กในที่สุด ดังสมการ (2.4)

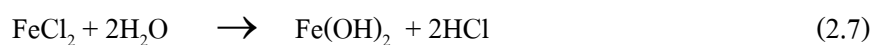
Anodic Reaction:



Cathodic Reaction:



Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นอีกส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดเป็นเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_2) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะกลายเป็นสนิมเหล็กเช่นกัน ดังสมการ (2.6) และ (2.7)



การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการขยายตัว เนื่องจากเหล็กเสริมมีปริมาณมากกว่าเนื้อเหล็กเดิมหลายเท่า ซึ่งอาจมากถึง 4-6 เท่า และดันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหาย (แสดงดังรูปที่ 2.12) โดยระยะทางที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีอาจยาวตั้งแต่ 10 มิลลิเมตร จนถึง 6 เมตร ทำให้สนิมอาจเกิดต่างบริเวณกับจุดที่เกิดการกัดกร่อนของเนื้อเหล็ก และเมื่อเหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนจากสนิมมากขึ้นเรื่อย ๆ คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมจะเกิดการแตกร้าวตามแนวของเหล็กเสริม จนในที่สุดก็จะหลุดล่อนออกมา รอยร้าวที่เกิดขึ้นยังเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็วและมากยิ่งขึ้น ทำให้เร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้นด้วย หากเหล็กเสริมเกิดสนิมเหล็กอย่างรุนแรง คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอาจหลุดกะเทาะออกมาเป็นบริเวณกว้าง นอกจากนี้ในสภาวะแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงอย่างเช่นน้ำทะเล เหล็กเสริมอาจถูกกัดกร่อนเป็นรอยลึกขนาดใหญ่ที่เรียกว่า Pitting Corrosion ซึ่งจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงอย่างมากและส่งผลอันตรายต่อการรับกำลังของคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.5 ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต

การที่คลอไรด์ไอออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตได้นั้น จะขึ้นกับปัจจัย ต่าง ๆ หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ สภาพการบ่มคอนกรีต อุณหภูมิ ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ ชนิดของแคทไอออน และสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างนั้น ๆ เผชิญ เป็นต้น โดยปริมาณ คลอไรด์ที่อยู่ภายในเนื้อของคอนกรีต นั้น เป็นผลรวมของ คลอไรด์ 2 ประเภท (คณะกรรมการการคอนกรีตและวัสดุ, 2543) ได้แก่

1) คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตจะถูกยึดจับโดยกลไกดังต่อไปนี้ คือ

1.1 การดักจับทางเคมี (Chemical binding) คลอไรด์บางส่วนจะถูกยึดจับโดยผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration products) เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Friedel's salt) หรือ $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Calcium Chloroferrite)

1.2 การดักจับทางกายภาพ (Physical binding) คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น ทราย หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

2) คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือ คลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) โดยคลอไรด์นี้เป็นส่วนหนึ่งของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ดังนั้น ถ้าสามารถยึดจับคลอไรด์อิสระนี้ไว้ได้ก็จะสามารถยืดระยะเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กออกไปได้

2.6 ผลกระทบของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก

คลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิม โดยไอออนของคลอไรด์ ซึมเข้าไปในคอนกรีตทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่อมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอจะทำให้เหล็กเกิดสนิม และสนิมเหล็กก็ขยายตัวดันคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมให้แตกร้าวในที่สุดคลอไรด์ของเนื้อของคอนกรีตนั้นอาจมีอยู่ในคอนกรีตเองหรือมาจากภายนอกโครงสร้างคอนกรีต โดยคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตเองนั้นอาจมาจากน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต หิน ทราย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หิน ทราย จากแหล่งที่อยู่ใกล้ทะเล หรือในน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ซึ่งจะมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น ส่วนมากจะมาจาก คลอไรด์ภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น คลอไรด์ที่มาจากสภาพแวดล้อมทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในการละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว ซึ่งคลอไรด์จะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธีการแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตด้วยกระบวนการต่อไปนี้

การแพร่ (Diffusion) โดยการแพร่นี้จะเป็นการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนเข้าไปยังโพรงของคอนกรีตที่อิ่มตัว แรงขับเคลื่อนของคลอไรด์ไอออนในกลไกนี้จะเกิดจากความเข้มข้นของไอออน โดยคลอไรด์ไอออนจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนสูงไปยัง บริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนต่ำ

การดึงดูดแบบแคปิลลารี (Capillary suction) โดยการดึงดูดแบบแคปิลลารีนี้สามารถดึงน้ำเกลือผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็ก ๆ ในเนื้อบริเวณผิวของคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลจะอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง เมื่อคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแห้งถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล น้ำทะเลจะถูกดึงเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็ก ๆ ที่อยู่ในเนื้อของคอนกรีต โดยกลไกการดึงดูดแบบแคปิลลารีซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ใช้ระยะเวลาอันสั้น

การดึงดูดไอออน (Ion adsorption) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลาพบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สารละลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์การนี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีต เท่ากับความเข้มข้นของคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดไอออนจะเกิดขึ้นเนื่องจาก บริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตที่มีประจุไฟฟ้าบวกบริเวณที่ผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีต จะดึงดูดคลอไรด์ไอออน ซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่ในบริเวณนั้น

แรงดันน้ำ (Hydraulic pressure) โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน อุโมงค์ ฯลฯ ความแตกต่างของ Hydraulic head สามารถทำให้น้ำซึ่งมีคลอไรด์ไอออน เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปภายในคอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic head สูงไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำ

ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดยการแพร่ หรือการซึมผ่านจนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้น ไอออนของคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวคอนกรีตจะซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกสลับแห้งจะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวคอนกรีตมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อย ๆ และเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตเปียกได้เร็วแต่แห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของไอออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกสลับแห้ง สถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันแต่ละส่วนอาจประสบกับสภาวะเปียก

และแห้งไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้อิออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่สัมผัสน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) มีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณอิออนของคลอไรด์มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

คลอไรด์เมื่อซึมเข้าสู่คอนกรีตบางส่วนจะถูกจับตัวเพื่อทำปฏิกิริยากับ C_3A ได้ Calcium Chloro-Aluminate ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) ซึ่งเรียกว่า Friedel's Salt และยังทำปฏิกิริยากับ C_4AF ได้ Calcium Chloroferrite ($3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่าคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) มีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างของคอนกรีต (Pore Solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ไว้เป็นจำนวนมากได้ จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้ และเป็นที่ทราบกันดีว่าการใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูง จะสามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ได้ดี แต่การใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A สูงจะทำให้เกิดความร้อนสูงซึ่งไม่เหมาะกับการใช้งานคอนกรีตหนา และในน้ำทะเลไม่ได้มีสารละลายคลอไรด์เพียงอย่างเดียวแต่ยังมีสารละลายซัลเฟตอยู่ด้วย ซึ่งการต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตนั้นต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่ C_3A ต่ำ ซึ่งเป็นสิ่งที่ขัดแย้งกันอยู่ ดังนั้นในต่างประเทศจึงใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 ที่มีปริมาณ C_3A อยู่ปานกลาง

2.7 ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็ก

ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการส่งผ่านคลอไรด์อิออนเข้าไปในคอนกรีต การมีระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กที่เหมาะสมกับระยะเวลาการใช้งานคอนกรีต จะช่วยให้ คลอไรด์ไม่สามารถเดินทางมาถึงผิวของเหล็กเสริมได้ ฉะนั้นความทึบน้ำของคอนกรีตและระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กจึงเป็นปัจจัยอันดับต้น ๆ ที่ควรคำนึงถึง ด้วยเหตุนี้ มาตรฐานการออกแบบเกือบทุกมาตรฐานจึงกำหนดทั้งระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กขั้นต่ำ และกำลังอัดของคอนกรีตที่ควรมีกำลังสูงกว่าปกติควบคู่กันไป เมื่อคอนกรีตต้องสัมผัสกับน้ำทะเล

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดในเรื่องระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็ก อันดับแรก คือ ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กจะไม่มีประโยชน์ต่อการป้องกันเหล็กเสริม ถ้าคอนกรีตที่ใช้มีความพรุนสูง จนสารเคมีต่าง ๆ สามารถซึมเข้าไปได้ อนึ่ง จุดประสงค์ของการกำหนดระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กไม่ได้มีไว้เพื่อป้องกันเหล็กเสริมเพียงอย่างเดียว แต่ช่วยทำให้มั่นใจได้ว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถรับแรงกระทำได้ รวมไปถึงการป้องกันอันตรายจากเพลิงไหม้ หรือต้านทานการสึกกร่อน การมีระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กที่มากเกินไปเป็นผลมาจากคอนกรีตมีปริมาตรมาก ซึ่งเสมือนว่าคอนกรีตนั้นไม่มีการเสริมกำลังด้วยเหล็กเสริม

นอกจากนั้น ระยะเวลาการหดตัวของเหล็กยังช่วยควบคุมการหดตัว (Shrinkage) และความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal stresses) รวมไปถึงช่วยป้องกันรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นจากความเค้น เมื่อเกิดรอยแตกขึ้น ระยะเวลาการหดตัวของเหล็กที่มีความหนาไม่เกิน 100 มม. (3 ถึง 4 นิ้ว) จะทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างในทางปฏิบัติ ความหนาของระยะเวลาการหดตัวของเหล็กควรมีค่าไม่เกิน 80 ถึง 100 มม. (3 ถึง 4 นิ้ว) ซึ่งการตัดสินใจเลือกใช้ระยะเวลาการหดตัวของเหล็ก ควรพิจารณาตามมาตรฐานการออกแบบที่กำหนดไว้

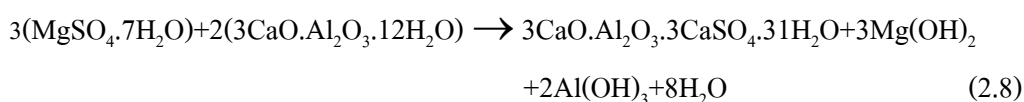
การเลือกใช้ระยะเวลาการหดตัวของเหล็กที่มีความหนาน้อย อาจทำให้คลอไรด์สามารถซึมเข้าไปถึงเหล็กเสริมได้ง่าย เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อาจไม่มีความทึบน้ำ เกิดรอยแตก หรือในระหว่างการก่อสร้าง อาจวางเหล็กเสริมผิดตำแหน่ง

2.8 การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต

เกลือซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำใต้ดิน เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) อำนาจการทำลายของซัลเฟต ต่อคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟต และความชื้น การทำลายของซัลเฟตจะไม่แสดงออกเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่มีอำนาจรุนแรงเมื่อคอนกรีตเปียกชื้น และรุนแรงมากในกรณีที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง โดยสารละลายจะค่อย ๆ ซึมเข้าไปภายในช่องว่างของเนื้อคอนกรีตและทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดการขยายตัวและแตกร้าวจนไม่สามารถรับกำลังได้

สารละลายซัลเฟตในน้ำทะเลที่กัดกร่อนคอนกรีตโดยตรงและรุนแรงคือ แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ซึ่งมีความเข้มข้นสูง และมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดีกว่าเกลือซัลเฟตอื่น ๆ เมื่อแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) จากน้ำทะเลแพร่กระจายเข้ามาในโพรงหรือช่องว่างระหว่างคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังต่อไปนี้ (Mather, 1966)

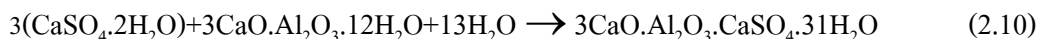
แมกนีเซียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไฮเดรต ได้สารประกอบ คือ แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ (2.8)



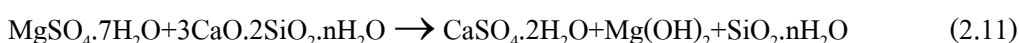
แมกนีเซียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้เป็นแคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม ดังสมการที่ (2.9)



แคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัมที่ได้ สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรตได้เป็น แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ดังสมการที่ (2.10)



นอกจากนี้ แมกนีเซียมซัลเฟตยังทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต ปฏิกิริยานี้เป็น การดึง แคลเซียม (Decalcification) จาก C-S-H ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซัลเฟตแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาเจล ดังสมการที่ (2.11)



แคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นในสมการที่ 2.10 สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต ดังสมการที่ 2.9 ได้อีก ในที่สุดแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล เกิดเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรต ดังสมการที่ (2.12)



ยิปซัมที่เกิดตามสมการที่ (2.9) และ (2.11) และแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตที่เกิดตามสมการที่ (2.8) และ (2.10) มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าสารประกอบเดิม มีการขยายตัวทำให้มีปริมาตรมากขึ้น และเกิดแรงดันภายในคอนกรีตเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าวในที่สุด ส่วนซิลิกาเจลและแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรต ซึ่งเกิดตามสมการที่ (2.11) และ (2.12) เป็นสารที่ไม่แข็งแรงเท่ากับแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่สูญเสียไปตามสมการที่ (2.11) ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง การลดปริมาณของ C_3A ให้น้อยลง จะทำให้ปริมาณของแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรตลดลง ส่งผลให้ปริมาณการเกิดยิปซัม แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต และแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตลดลงตามไปด้วย จึงทำให้การกักกร่อนของซัลเฟต ลดลง ดังนั้น การใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A ต่ำ จึงสามารถลดการกักกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้

2.9 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) ตามคำจำกัดความของ ASTM C 618 หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือ ซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับ

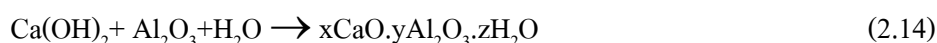
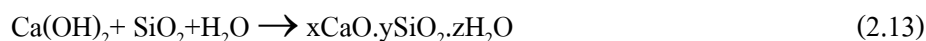
ปูนซีเมนต์ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolans) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาวเผา (Met kaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่ง คือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolans) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟุ้ง เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าชานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ดินขาวเผา เป็นต้น

ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตในรูปของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นทั้งในด้านความสามารถรับแรงอัด ความทนทานต่อการกัดกร่อน และความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตได้

2.10 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

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

ปฏิกิริยาปอซโซลาน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไดรอกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ดังสมการที่ (2.13) และ (2.14) ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน (Fraay et al., 1989) และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อย ๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครึ่งก็ตาม (Hansen, 1990)



2.11 เถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหิน (Fly Ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะนำไปเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงมายังก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ส่วนเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1

ไมครอน จนถึงประมาณ 200 ไมครอนจะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่า เถ้าถ่านหิน เถ้าถ่านหินจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปมีความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์เล็กน้อย ลักษณะส่วนใหญ่เป็นรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.001 มม.) จนถึง 150 ไมโครเมตร (0.15 มม.) ความละเอียดของเถ้าถ่านหินขึ้นอยู่กับกระบวนการบดถ่านหิน ชนิดของเครื่องบด และชนิดของเตาเผา ถ่านหินที่เผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเตาเผาจะมีความละเอียดสูงและมีทรงกลม แต่กรณีที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ รูปร่างของเถ้าถ่านหินจะไม่แน่นอน เถ้าถ่านหินที่ละเอียดจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นทำให้กำลังอัดคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า

องค์ประกอบหลักของเถ้าถ่านหินคือ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดขึ้นอยู่กับ ชนิดของเถ้าถ่านหิน อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมขณะเผา ASTM C 618 จึงแยกเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ประเภท คือ ชนิด F และ ชนิด C โดยเถ้าถ่านหิน ชนิด F มีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ส่วนที่เถ้าถ่านหินชนิด C มีผลรวมของปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก ส่วนใหญ่ถ่านหินชนิดแอนทราไซต์ (anthracite) และบิทูมินัส (bituminous) เมื่อเผาแล้วจะได้เถ้าถ่านหิน ชนิด F โดยทั่วไปเถ้าถ่านหิน ชนิด F จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ค่อนข้างต่ำ คือ น้อยกว่า ร้อยละ 5 ซึ่งบางครั้งเรียกว่า Low-Calcium Fly Ash ส่วนถ่านหินสับบิทูมินัส (sub-bituminous) และถ่านหินลิกไนต์ (lignite) เมื่อเผาแล้วจะได้เถ้าถ่านหิน ชนิด C ซึ่งเถ้าถ่านหิน ชนิด C จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์มากกว่าร้อยละ 10 ถือว่าเป็นเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมสูง (High-Calcium Fly Ash) ซึ่งอาจจะมีคุณสมบัติของซีเมนต์ร่วมกับคุณสมบัติปอซโซลานในตัวเอง

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

โดยทั่วไปเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำจะมีปริมาณคาร์บอนต่ำ (ต่ำกว่าร้อยละ 1) และหากเถ้าถ่านหินมีปริมาณแคลเซียมสูงจะมีปริมาณคาร์บอนสูงเช่นกันซึ่งอาจสูงถึงร้อยละ 10 ดังนั้นมาตรฐานจึงกำหนดให้สามารถใช้เถ้าถ่านหิน ชนิด F ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูงถึงร้อยละ 12 ได้ ถ้ามีผลการใช้งานหรือผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือ เนื่องจากคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่ทำให้เถ้าถ่าน

หินมีลักษณะเป็นรูปทรงแปด มีพื้นที่ผิวสูงทำให้สามารถดูดน้ำได้มาก และทำให้ความต้องการน้ำสูงขึ้น นอกจากนี้ยังดูดซับสารเคมีผสม ทำให้ต้องใช้สารเคมีผสมเพิ่มมากขึ้น การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีใช้กันอยู่ 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่ การเผาความร้อนสูง การเผาความร้อนปานกลาง และการเผาความร้อนต่ำ

1) การเผาความร้อนสูง ในการเผาความร้อนสูงอุณหภูมิจะสูงถึง 1,500-1,700 °C เป็นการเผาแบบใช้แรงลม (Cyclone Combustion) ที่อุณหภูมิสูง ถ่านหินส่วนใหญ่จะหลอมละลายและรวมกันเป็นเม็ดหรือก้อน ถ่านหินส่วนที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าก้นเตาและตกลงในอ่างน้ำข้างล่าง ถ่านหินขนาดเล็กจะเป็นเถ้าลอยซึ่งในระบบการเผาจะมีปริมาณค่อนข้างน้อย ถ่านหินที่ได้จะมีลักษณะเป็นแก้วเม็ดออกใสๆ (Vitreous particle)

2) การเผาความร้อนปานกลาง อุณหภูมิของการเผาถ่านหินบดในการเผาความร้อนปานกลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1,100-1,400 °C เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized Coal Combustion) ถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าลอย ที่เหลือจะเป็นเถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตา เถ้าลอยที่ได้จากการเผานี้ประมาณร้อยละ 70-90 มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน เป็นเถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อทำคอนกรีต เช่น ถ่านหินจากโรงไฟฟ้าใน อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

3) การเผาความร้อนต่ำ เป็นการเผาในเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized-bed Combustion) อุณหภูมิของการเผาถ่านหินค่อนข้างต่ำคือไม่เกิน 900 °C ถ่านหินที่ได้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากถ่านหินที่ได้ไม่ได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่สูงพอ แม้จะสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานได้แต่ไม่ดีเท่าเถ้าลอยที่ได้จากการเผาความร้อนปานกลาง แต่วิธีนี้ก็เริ่มใช้กันมากขึ้นสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กในโรงงาน เช่น โรงไฟฟ้าในจังหวัดราชบุรี จังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดระยอง และจังหวัดปราจีนบุรี

ถ่านหินจาก บริษัท เนชั่นแนล เพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด (โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า เอ็น. พี. เอส.) อำเภอศรีมหาโพธิ จังหวัดปราจีนบุรี เป็นถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินประเภทบิทูมินัส และแอนทราไซต์ ซึ่งนำเข้ามาจากประเทศเวียดนามและอินโดนีเซีย มีระบบเผาไหม้แบบ Circulating Fluidized Bed Combustion ลักษณะของเตาเผาแบบนี้สามารถผสมถ่านหินกับวัสดุอื่น ๆ ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ซึ่งบางครั้งทางโรงงานก็ใช้เกลบเป็นเชื้อเพลิงเพิ่มเติม ขนาดของถ่านหินที่ใช้ต้องมีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 8 มิลลิเมตร อุณหภูมิการเผาไหม้อยู่ระหว่าง 800-900 °C วัสดุพื้นฐาน ที่ใช้รักษาความร้อนในเตาเผาให้สม่ำเสมอ คือ ทราช ซึ่งเป็นวัสดุเนื้อที่ทนความร้อนได้ดี ขณะเกิดกระบวนการเผาไหม้ ถ่านหินจะถูกดักจับด้วย ระบบดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

บริษัท เนชั่นแนล เพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด มีโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจำนวน 2 โรง คือ โรงที่ 7 และ 8 ใช้ถ่านหินเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ปริมาณวันละ 3,400 ตัน ทำให้ได้ผลพลอยได้เป็นเถ้า

ถ่านหิน 500 ถึง 600 ตันต่อวัน ซึ่งถือว่าเป็นปริมาณที่ค่อนข้างสูง เหมาะสมที่จะผลักดันให้เกิดการนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรมอย่างจริงจัง

งานวิจัยในประเทศไทยและต่างประเทศหลายชิ้นที่แสดงให้เห็นว่า ถ่านหินมีคุณสมบัติในการลดการซึมผ่านของคลอไรด์ และป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิม ทำให้ถ่านหินมีความเหมาะสมในการนำไปใช้เพื่อต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเล

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คุณสมบัติด้านกำลังอัดเป็นสิ่งที่สำคัญในการออกแบบ ปัจจุบันพบว่าความทนทานเป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งเช่นกัน เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะสามารถรับกำลังได้ตามที่ออกแบบ จำเป็นต้องมีความทนทานด้วย หากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมน้อยจะส่งผลให้กำลังของโครงสร้างลดลงด้วย โดยเฉพาะโครงสร้างที่ต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเล ซึ่งเกิดปัญหาการกัดกร่อนทั้งทางกายภาพและสารเคมี จึงจำเป็นต้องออกแบบให้โครงสร้างมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมเหล่านี้ คุณสมบัติโดยทั่วไปของโครงสร้างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลควรทนทานต่อการกัดกร่อนจากคลอไรด์และซัลเฟตได้ดี ซึ่งหมายถึงการที่คลอไรด์และซัลเฟตสามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ยาก

ดังนั้นควรออกแบบคอนกรีตให้มีความหนาแน่นสูง มีคุณสมบัติการซึมผ่านน้ำผ่านคอนกรีตต่ำ ซึ่งหมายถึงออกแบบคอนกรีตให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ทำคอนกรีตให้แน่นและมีการบ่มคอนกรีตที่ดี ทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดี มีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีในระดับหนึ่ง ตามมาตรฐาน ACI 201.2R กำหนดให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์หรือซัลเฟตสูง มีค่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานอยู่ในช่วง 0.40 ถึง 0.45 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 50 ถึง 60 มม. และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพื่อลดความเสี่ยงของการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต (กรณีที่คอนกรีตดังกล่าวสัมผัสกับซัลเฟต)

การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แม้ว่าจะต้านทานการกัดกร่อนซัลเฟตได้ดี แต่การต้านทานการเป็นสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ยังน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากมี C_3A น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังนั้นการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอสำหรับสภาวะที่มีการกัดกร่อนรุนแรงอย่างเช่นสภาวะแวดล้อมทะเล

การทำให้คอนกรีตมีความทนทานนั้นมีหลายวิธี เช่น การเคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลีเมอร์ อีพ็อกซี โพลียูรีเทน เป็นต้น หรือการเคลือบผิวเหล็กเสริมด้วยอีพ็อกซีหรือสังกะสี ก็นับเป็นอีกวิธีที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อนได้ดีแต่เป็นวิธีที่ยุ้งยากและมีค่าใช้จ่ายสูง การใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น ถ่านหินในส่วนผสมคอนกรีตนับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ โดยมีงานวิจัยจำนวนมากสนับสนุนว่าวัสดุ

ปอชโซลานสามารถช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีต่างๆ ได้ดี และยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายเนื่องจากวัสดุปอชโซลานส่วนใหญ่เป็นผลพลอยได้จากการผลิตและเป็นวัสดุเหลือทิ้ง

อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติแล้ว การป้องกันหรือเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตและคลอไรด์อาจมีวิธีการอื่นๆ อีกหลายวิธี ซึ่งวิธีการเหล่านี้อาจใช้ร่วมกันได้เพื่อให้เกิดผลดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการศึกษาตามความเหมาะสม เช่น ความสำคัญของโครงสร้าง อายุและลักษณะการใช้งาน ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง การซ่อมแซมบำรุงรักษา เป็นต้น

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตเพื่อใช้ในงานคอนกรีตมีมากขึ้นทั้งในส่วนที่เกี่ยวข้องกับสมบัติเชิงกล และสมบัติด้านความคงทน โดยแนวทางการศึกษาส่วนใหญ่ได้เน้นที่การปรับปรุงสมบัติของเพสต์เพื่อชดเชยข้อด้อยของมวลรวม โดยใช้วัสดุปอชโซลานที่มีคุณภาพดี ที่มีผลการวิจัยจากการศึกษาในมวลรวมจากธรรมชาติว่าให้ผลไปในทิศทางที่ดี มาใช้ปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต

รัฐพล สมณาและชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำเถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน อัตราร้อยละ 20, 35, 50 โดยน้ำหนักต่อวัสดุประสาน ในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการรับกำลังอัด การซึมผ่านน้ำและการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า ผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนที่ดีที่สุดของการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดคือร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานการใช้เถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตควบคุมประมาณ 2 ถึง 3 เท่า และต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าที่ไม่ใช่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดประมาณ 3 ถึง 5 เท่า

นอกจากนั้น Somna และคณะ (2012) ได้ศึกษาผลของการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีต โดยแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และได้ทดสอบ กำลังอัด ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น การซึมผ่านน้ำ และความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ ผลการศึกษา พบว่า มอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ทั้งที่ผสมเถ้าชานอ้อยและไม่ผสมมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติประมาณร้อยละ 19 นอกจากนี้พบว่า การแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้การซึมผ่านน้ำและความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตลดลง ตลอดจนการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดผสมในคอนกรีตร้อยละ 20 โดย

น้ำหนักวัสดุประสาน สามารถใช้ในการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตได้ดี เนื่องจากให้ผลดีทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านความคงทน

ในส่วนของการใช้เถ้าถ่านหินในการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต Somna และคณะ (2012) ได้ศึกษา ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและเถ้าถ่านหินบดละเอียดต่อสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยแทนที่เถ้าถ่านหินบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 โดยทดสอบ กำลังอัด ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น การซึมผ่านน้ำ ผลการศึกษาพบว่า เถ้าถ่านหินบดละเอียดสามารถใช้ในการปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตได้ดี โดยให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน และพบว่า สามารถใช้เถ้าถ่านหินในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ได้สูงถึงร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และไม่ควรใช้เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และ 0.65 นอกจากนี้พบว่า มอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ทั้งที่ผสมเถ้าถ่านหินและไม่ผสม มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติประมาณร้อยละ 16 ถึง 20 ตลอดจนการแทนที่เถ้าถ่านหินบดละเอียดสามารถลดการซึมผ่านน้ำได้ดีกว่าการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีต

การศึกษาการใช้เถ้าถ่านหินเพื่อปรับปรุงคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต เพื่อใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล น้ำพล และคณะ (2556) ได้ศึกษา การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมจากเศษคอนกรีต ที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 1 ปี ผลการศึกษา พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งเป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสมมากขึ้น ช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้ดีขึ้น การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน อย่างไรก็ตามในการศึกษารั้งนี้จะทำการเก็บข้อมูลต่อเนื่องจากงานวิจัยดังกล่าวนี้ โดยเพิ่มข้อมูลในส่วนของการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระ การกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีต และโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน โดยมีการเก็บข้อมูลที่อายุ 5 ปี ซึ่งจะให้เห็นผลการศึกษาที่ชัดเจน และยืนยันการนำคอนกรีตไปใช้ก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้เถ้าถ่านหินช่วยปรับปรุงคุณภาพได้อย่างมั่นใจมากขึ้น

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

บทนี้กล่าวถึงระเบียบวิธีที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งประกอบด้วย วัสดุ และการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการศึกษา อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการทดสอบในแต่ละขั้นตอน ซึ่งแยกเป็นรายละเอียด ดังนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตาม มอก.15-2532
2. แก้วถ่านหิน โดยใช้แก้วถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอ แม่เมาะ จังหวัด ลำปาง
3. มวยรวมหยาบที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต
4. ทราชม้วนน้ำหยาบ
5. น้ำทะเลที่ใช้ในการแช่ตัวอย่างทดสอบ
6. น้ำประปา เพื่อใช้ในการผสมคอนกรีต
7. เหล็กเส้นกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ฟังไว้ในก้อนตัวอย่าง
8. สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ มีโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) ซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) กรดไนตริก (HNO_3) โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) และแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Universal testing machine) (แสดงดังรูปที่ 3.1 ก)
2. เครื่องบดวัสดุ (Grinding machine) (แสดงดังรูปที่ 3.1 ข)
3. แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 200 มม. (แสดงดังรูปที่ 3.1 ค)
4. แบบฝังเหล็กเสริมลงในคอนกรีต(แสดงดังรูปที่ 3.1 ง)
5. ชุดทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ หิน ทราชม้วน
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
7. ชุดทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต
8. ตู้อบปรับอุณหภูมิได้
9. ตะแกรงร่อนมาตรฐาน (แสดงดังรูปที่ 3.1 จ)
10. เครื่องเจาะคอนกรีต (แสดงดังรูปที่ 3.1 ฉ)
11. เครื่องตัดคอนกรีต (แสดงดังรูปที่ 3.1 ช)
12. เครื่องชั่งน้ำหนัก (แสดงดังรูปที่ 3.1 ซ)

13. เครื่องตม (แสดงดังรูปที่ 3.1 ฉ)
14. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาดต่างๆ (แสดงดังรูปที่ 3.1 ฉ)
15. ขวดชมพู (แสดงดังรูปที่ 3.1 ฉ)
16. กระดาษกรอง
17. ปิเปตต์ (pipette) (แสดงดังรูปที่ 3.1 ฉ)
18. กระจกตวง (แสดงดังรูปที่ 3.1 ฉ)
19. แท่งแก้ว ที่ตักสาร (แสดงดังรูปที่ 3.1 ฉ)
20. ครกหิน (แสดงดังรูปที่ 3.1 ฉ)
21. ชุดไทเทรตอัตโนมัติ (แสดงดังรูปที่ 3.1 ฉ)
22. กรวยกรอง (แสดงดังรูปที่ 3.1 ฉ)
23. หลอดหยด (Dropper)
24. เครื่องดูดสุญญากาศ (แสดงดังรูปที่ 3.1 ฉ)
25. กราฟและปากกาเขียนพลาสติก



(ก) เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต



(ข) เครื่องบดวัสดุ



(ค) แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต (ง) แบบฟุ้งเหล็กลงในคอนกรีต (จ) ตะแกรงร้อนมาตรฐาน



(ฉ) เครื่องเจาะคอนกรีต



(ซ) เครื่องตัดคอนกรีต



(ช) เครื่องชั่งน้ำหนัก



(ฅ) เครื่องต้ม



(ญ) เครื่องแก้วที่ใช้ในการไทเทรต



(ฎ) ครกหิน



(ฏ) ชุดไทเทรตอัตโนมัติ



(ฐ) กรวยกรอง



(ฑ) เครื่องดูดสุญญากาศ

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

3.3 วิธีการทดสอบและเตรียมตัวอย่างทดสอบ

3.3.1 การเตรียมวัสดุทดสอบ

เถ่าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอ แม่เมาะ จังหวัด ลำปาง
เหล็กเส้นกลมผิวเรียบที่ใช้ในการทำโครงงานนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. นำมาตัดให้มี
ความยาวท่อนละประมาณ 50 มม.

3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของปูนซีเมนต์และเถ่าถ่านหิน

ทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง และเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โดยใช้ขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิเออร์ (Le Chatelier) ตามมาตรฐาน ASTM C 188 ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับวัสดุนั้น โดยปริมาตรของวัสดุที่ทำการทดสอบหาได้จากการแทนที่ในน้ำมันก๊าด ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์หรือเถ้าถ่านหิน ทำให้ปูนซีเมนต์หรือเถ้าถ่านหินแข็งตัวมีปริมาตรเปลี่ยนไป

ทดสอบความละเอียดของเถ้าถ่านหิน โดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (มีขนาดช่องเปิดเท่ากับ 45 ไมโครเมตร) ด้วยวิธีร่อนแบบเปียก (Wet Sieve Analysis) ซึ่งทำโดยการชั่งน้ำหนักวัสดุก่อนนำไปร่อนผ่านตะแกรงโดยใช้น้ำ เมื่อนำไปอบให้แห้งจะได้ส่วนที่เหลือบนตะแกรง ซึ่งเป็นน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ถ่ายภาพขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง และเถ้าถ่านหิน ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง และเถ้าถ่านหิน วิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำทะเลที่แช่ตัวอย่างคอนกรีต โดยการเก็บตัวอย่างน้ำทะเลมาทดสอบคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH), ปริมาณคลอไรด์และซัลเฟต

3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม

ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C 127 และ ASTM C 128 ตามลำดับ ซึ่งความถ่วงจำเพาะของมวลรวม คือ อัตราส่วนของน้ำหนักมวลรวมในอากาศเทียบกับน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกัน และทำการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ เพื่อทราบถึงปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไปจนเต็มช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ของมวลรวม แต่ไม่รวมน้ำที่เกาะอยู่ผิวนอกของมวลรวม ซึ่งค่าทั้งสองจะนำไปใช้ในการออกแบบปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.3.4 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

โครงการนี้ทำการออกแบบปฏิกิริยาส่วนผสมตามวิธีของสถาบันคอนกรีตอเมริกัน (ACI) ออกแบบให้คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งเป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และในคอนกรีตใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตเป็นมวลรวมหยาบ มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้มีคอนกรีตที่ทำการศึกษา 15 ส่วนผสม และควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตระหว่าง 50 ถึง 100 มม. หากการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด จะใช้สารลดน้ำพิเศษช่วยในการเพิ่มความสามารรถได้ ซึ่งอัตราส่วนผสมคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ทำการหล่อคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200 มม. เพื่อฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. เพื่อฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ให้มี

ระยะหุ้มของคอนกรีตหนาเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. ดังนั้น จึงได้เตรียมแบบสำหรับฝังเหล็กเส้นกลมลงในคอนกรีต โดยแบบฝังเหล็กในรูปแบบนี้จะใช้หล่อคอนกรีตที่จะทำการเก็บข้อมูลในระยะยาวประมาณ 1 ปีขึ้นไป ในการหล่อตัวอย่างคอนกรีตจะนำแบบเหล็กดังกล่าว ไปวางบนแบบหล่อ จากนั้นใช้เหล็กนำร่องเสียบเข้าไปในแบบฝังเหล็ก เพื่อเป็นการดันให้คอนกรีตเกิดช่องว่างสำหรับที่จะฝังเหล็ก แล้วจึงทำการหย่อนเหล็กเส้นกลมลงไปนคอนกรีต โดยให้เหล็กอยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของคอนกรีต (แสดงดังรูปที่ 3.2) คอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์นี้ใช้สำหรับการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต และทดสอบความเป็นสนิมที่เกิดขึ้นกับเหล็กที่ถูกฝังไว้ในคอนกรีต

หลังจากทำการถอดแบบคอนกรีตแล้วเสร็จ จะนำคอนกรีตที่ได้ไปบ่มในน้ำประปาจนอายุคอนกรีตครบ 28 วัน แล้วจึงนำไปแช่น้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี โดยคอนกรีตจะสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลบแห้ง ตามน้ำขึ้น-ลง (แสดงดังรูปที่ 3.3) พร้อมทั้งทำการเก็บตัวอย่างน้ำทะเล เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณคลอไรด์และซัลเฟต ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตเมื่ออายุการแช่น้ำทะเลครบ 1 ปี เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต และทดสอบความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

ตารางที่ 3.1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

ส่วนผสม	สัดส่วนผสมต่อคอนกรีต (กก./ม. ³)				
	วัสดุประสาน		ทราย	มวลรวมจากเศษคอนกรีต	น้ำ
	ปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง	เถ้าถ่านหิน			
40FR00	477	0	767	935	190
40FR15	405	72	767	910	190
40FR25	358	119	767	894	190
40FR35	310	167	767	875	190
40FR50	239	239	767	850	190
45FR00	424	0	767	979	190
45FR15	360	64	767	957	190
45FR25	318	106	767	938	190
45FR35	276	148	767	925	190
45FR50	212	212	767	903	190
50FR00	385	0	767	1012	190
50FR15	327	58	767	990	190
50FR25	289	96	767	978	190
50FR35	250	135	767	964	190
50FR50	193	193	767	944	190

หมายเหตุ : คิดปริมาณน้ำที่อยู่ในสารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำพิเศษ เท่ากับ ร้อยละ 50 ของน้ำหนัก เนื่องจากตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แบ่งออกเป็นหลายประเภท ดังนั้นจึงได้กำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษาในแต่ละประเภทเพื่อความชัดเจน ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สัญลักษณ์ของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

สัญลักษณ์	ความหมาย
FR	เถ้าถ่านหิน จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอ แม่เมาะ จังหวัด ลำปาง
40,45,50	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ตามลำดับ
15, 25, 35, 50	คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

รูปแบบสัญลักษณ์ของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ A/FA/B โดย A เป็นส่วนที่ใช้บอกถึงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และ B เป็นส่วนที่แสดงถึงอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน ยกตัวอย่างเช่น

สัญลักษณ์ 40FR15 หมายถึง คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหิน แม่เมาะ บดละเอียด แทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ในอัตราส่วนร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



(ก) วางแบบฝิ่งเหล็กบนแบบหล่อคอนกรีต



(ข) ใช้เหล็กนำร่องเพื่อดันคอนกรีตให้เกิดช่องว่าง



(ค) หย่อนเหล็กลงในคอนกรีต



(ง) ตรวจสอบว่าเหล็กที่ฝิ่งอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ



(จ) ใช้เกรียงเกลี่ยคอนกรีตสดให้เต็มแบบหล่อ



(ฉ) ตกแต่งผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ

รูปที่ 3.2 การฝังเหล็กเสริมลงในคอนกรีต



(ก) คอนกรีตในสภาพเปื่อยก



(ข) คอนกรีตในสภาพแข็ง

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล

3.4 วิธีการทดสอบ

หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี จะนำตัวอย่างคอนกรีตมาเจาะทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระ (ตามมาตรฐาน ASTM C 1218) และคลอไรด์ทั้งหมด (ตามมาตรฐาน ASTM C 1152) ทดสอบกำลังอัดคอนกรีต การกัดกร่อนของสนิมเหล็ก และทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) และ energy dispersive spectroscopy (EDX) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.4.1 การทดสอบปริมาณคลอไรด์

หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลครบ 5 ปี จะนำตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ที่เตรียมไว้มาทำการเจาะบริเวณกึ่งกลางของก้อนตัวอย่าง จากนั้นนำแท่งตัวอย่างที่เจาะมาตัดที่ระดับความลึกต่างๆ ให้ลึกลงไปประมาณ 100 มม. (ตัดตัวอย่างหนาชั้นละ 10 มม.) แล้วบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20 นำผงตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20 แต่ละระยะความลึกมาทดสอบปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble chloride) ตาม ASTM C 1152 เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) นอกจากนั้นทำการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ

(Free chloride content) โดยใช้ น้ำ เป็นตัวทำละลาย (Water-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218

การทดสอบปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีตที่บดละเอียด โดยใช้ น้ำ และกรดเป็นตัวทำละลาย ในกรณีของกรดทำละลาย ทำได้โดยนำตัวอย่างที่ผ่านการบด 10 กรัม, กรดไนตริก (1:1) 75 มล. และน้ำกลั่น 25 มล. ผสมในบีกเกอร์ จากนั้นปิดด้วยกระจกนาฬิกา นำไปต้ม 3 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวด้วยอุณหภูมิต่ำ และนำมากรองด้วยกรวยกรอง โดยใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น นำตัวอย่างที่ได้มาทำการเจือจาง 5 เท่า (เนื่องจากคลอไรด์มีความเข้มข้นสูง) มาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์โดยการไตเตรทด้วยเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ ในกรณีของน้ำเป็นตัวทำละลายทำเหมือนกับใช้กรดเป็นตัวทำละลายแตกต่างกันที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายแทนกรดและแช่ตัวอย่างทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชม. ก่อนทำการไตเตรทด้วยเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) เมื่อตัวอย่างมีอายุแช่น้ำทะเลครบ 5 ปี ทำการเจาะก่อนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด 200 x 200 x 200 มม.³ เพื่อทดสอบหาการซึมผ่านของคลอไรด์โดยตัวอย่างที่เจาะมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. สูง 200 มม. (แสดงดังรูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 การเจาะตัวอย่างคอนกรีต

- 2) นำตัวอย่างทรงกระบอกมาทำการตัดตัวอย่างเป็นชั้น จากผิวบนไปยังแนวกึ่งกลางโดยในแต่ละชั้นหนา 10 มม. ทั้งหมด 8 ชั้น (แสดงดังรูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 การตัดตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะ

- 3) ทำการบดตัวอย่างที่ตัดแต่ละชั้นให้ละเอียด และนำตัวอย่างที่ทำการบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 เก็บส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 จำนวน 20 กรัมใส่ถุงบรรจุไว้เพื่อ นำไป ทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ (แสดงดังรูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 การบดตัวอย่างเพื่อทดสอบคลอไรด์

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble Chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1152 มีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัมโดยชั่งละเอียด 0.01 กรัม ใส่น้ำในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ดังรูป 3.7(ก)



ก) นำตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 มาชั่งน้ำหนัก

- 2) เติมน้ำกลั่นปริมาณ 75 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ดังรูปที่ 3.7(ข)



ข) เติมน้ำกลั่นลงไปบีกเกอร์ 75 มิลลิลิตร

3) เติมกรดไนตริก (HNO_3) เจือจาง (1:1) ปริมาณ 25 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ดังรูปที่ 3.7(ค)



ค) เติมกรดไนตริก เจือจาง (1:1) ไปในบีกเกอร์ 25 มิลลิลิตร

4) ปิดบีกเกอร์ด้วยถุงพลาสติก และนำไปต้มให้เดือดประมาณ 3 นาที ทิ้งไว้เย็นตัว ดังรูปที่ 3.7(ง)



ง) ปิดปากบีกเกอร์ด้วยถุงพลาสติกและนำไปต้มให้เดือดประมาณ 3 นาที

5) หลังจากตัวอย่างเย็นตัวแล้ว เติมน้ำกลั่นอีก 75 มิลลิลิตร ดังรูปที่ 3.7(จ)



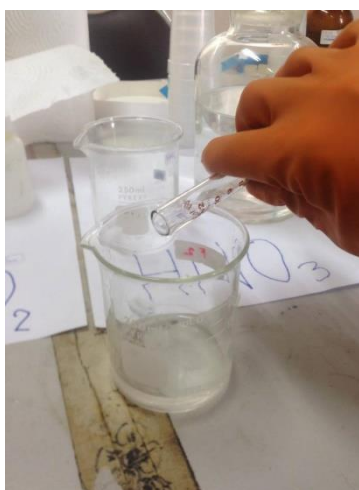
จ) เติมน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตร ลงในตัวอย่างที่ผ่านการต้ม

6) นำไปกรองผ่านกระดาษกรองใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น ดังรูปที่ 3.7(ฉ)



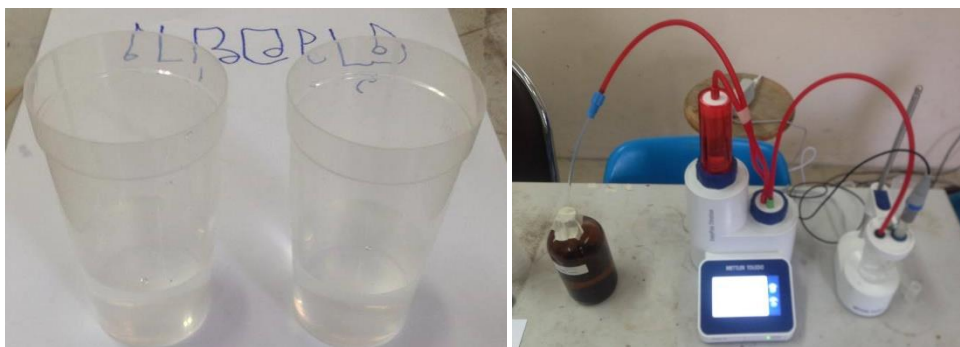
ฉ) กรองตัวอย่างทดสอบผ่านกระดาษกรอง

7) ใส่โซเดียมคลอไรด์ที่เข้มข้น 0.05 โมล/ลิตร ลงไป 2 มิลลิลิตร ดังรูปที่ 3.7(ช)



ช) เติมโซเดียมคลอไรด์ที่เข้มข้น 0.05 โมล/ลิตร ลงไป 2 มิลลิลิตร

- 8) นำตัวอย่างที่กรองแล้ว 10 มิลลิลิตร ใส่แก้วไทเทรต เติมน้ำอีกแก้วละ 30 มิลลิลิตร และนำไปไทเทรตโดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรด (AgNO_3) ที่เข้มข้น 0.05 โมล/ลิตร ผ่านเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ จะได้อ้อยละของคลอไรด์ต่อตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร และนำไปคำนวณ ทำจำนวน 2 ครั้ง ดังรูป 3.7(ซ)



ซ) การไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

รูปที่ 3.7 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ โดยใช้ น้ำเป็นตัวทำละลาย (*Water-soluble Chloride*) ตามมาตรฐาน *ASTM C 1218* มีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัมโดยชั่งละเอียด 0.01 กรัมใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 2) เติมน้ำปริมาณ 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ดังรูปที่ 3.8(ก)



ก) เทน้ำใส่ในตัวอย่างที่เตรียมไว้ 50 มิลลิลิตร

- 3) กรอบปากบีกเกอร์ด้วยกระดาษทิชชู และนำไปต้มให้เดือดประมาณ 5 นาที แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.8(ข)



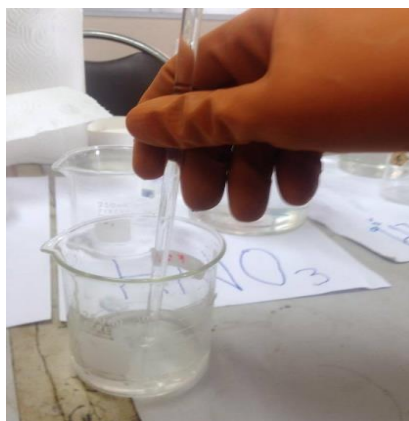
ข) กรอบปากบีกเกอร์ด้วยกระดาษทิชชูและนำไปต้มให้เดือดประมาณ 5 นาที

- 4) นำไปกรองผ่านกระดาษกรองใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น ดังรูปที่ 3.8(ค)



ค) นำไปกรองผ่านกระดาษกรองใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น

- 5) เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และกรดไนตริก (HNO_3) 3 มิลลิลิตร ดังรูปที่ 3.8(ง)



ง) เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และกรดไนตริก (HNO_3) 3 มิลลิลิตร

- 6) นำตัวอย่างที่กรองแล้ว 10 มิลลิลิตร ใส่แก้วไทเทรตจำนวน 2 แก้วและนำแท่งแม่เหล็กใส่ลงไป ดังรูปที่ 3.8(จ)



- จ) นำตัวอย่างใส่แก้วไทเทรต 2 แก้ว แก้วละ 10 มิลลิลิตร และใส่แท่งแม่เหล็ก
- รูปที่ 3.8** การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

- 7) นำไปไทเทรตโดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ที่เข้มข้น 0.05 โมล/ลิตร ผ่านเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ

3.4.2 การทดสอบความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

หลังจากนำตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม.³ ที่ผ่านการเจาะด้วยหัวเจาะขนาด 50 มม. แล้วมาทำการทำลายโดยเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Universal Testing Machine) เพื่อเก็บเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้มต่าง ๆ มาสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กในคอนกรีต โดยทำการวัดพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม ด้วยการใส่แผ่นกราฟพลาสติกใสที่มีช่องตารางขนาด 1×1 มม.² มาทาครอบแท่งเหล็กแล้วใช้ปากการะบายพื้นที่ที่เกิดสนิม นับพื้นที่สนิมที่เกิดขึ้น และนำมาเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของแท่งเหล็กทั้งหมด ค่าที่คำนวณได้คือพื้นที่การกัดกร่อนของเหล็ก (ร้อยละของพื้นที่ผิวที่เกิดสนิม) ดังสมการ 1 รวมทั้งใช้ภาพถ่ายรูปสนิมเหล็กประกอบในการวิเคราะห์การกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต (แสดงดังรูป 4)

$$C(\%) = (RA/SA) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ	C	คือ ร้อยละของพื้นที่ผิวแท่งเหล็กที่เกิดสนิม
	RA	คือ พื้นที่ผิวแท่งเหล็กที่เกิดสนิม (มม. ²)
	SA	คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของแท่งเหล็ก (มม. ²)

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

นำตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200 x 200 มม.³ ที่ผ่านการเจาะด้วยหัวเจาะขนาด 50 มม. แล้วมาทำการทำลายโดยเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Universal Testing Machine) เพื่อเก็บเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้มต่าง ๆ มาสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กในคอนกรีต ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การวัดการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

3.4.3 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลตามมาตรฐาน ASTM C39 จากตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 100 มม. สูง 200 มม. ที่แช่ในน้ำทะเลเมื่อ 5 ปี ที่แล้ว โดยนำตัวอย่างมาเคลือบหัวทั้ง 2 ด้าน หรือใช้การเจียร์ผิวให้เรียบทั้ง 2 ด้าน ก่อนทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

บทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน สมบัติของมวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ใช้ผสมคอนกรีต ที่ได้ทำการทดสอบในการเตรียมตัวอย่างเมื่อ 5 ปีที่แล้ว สมบัติของน้ำทะเลที่นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ ตลอดจนการวิเคราะห์ผลการทดสอบคอนกรีตหลังจากที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี ในด้านการแทรกซึมของคลอไรด์ และการกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

4.1 สมบัติของวัสดุประสาน

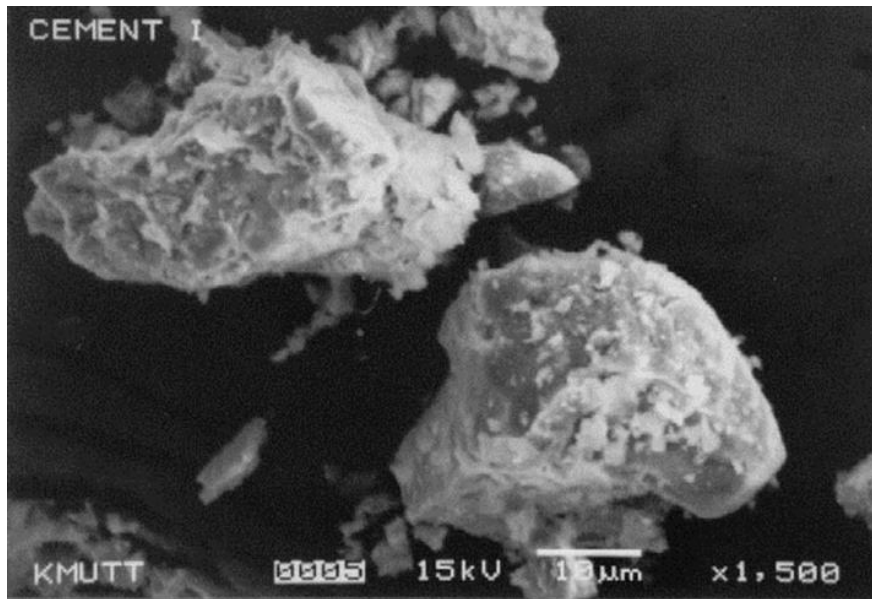
4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

4.1.1.1 ลักษณะทั่วไป และสีของวัสดุ

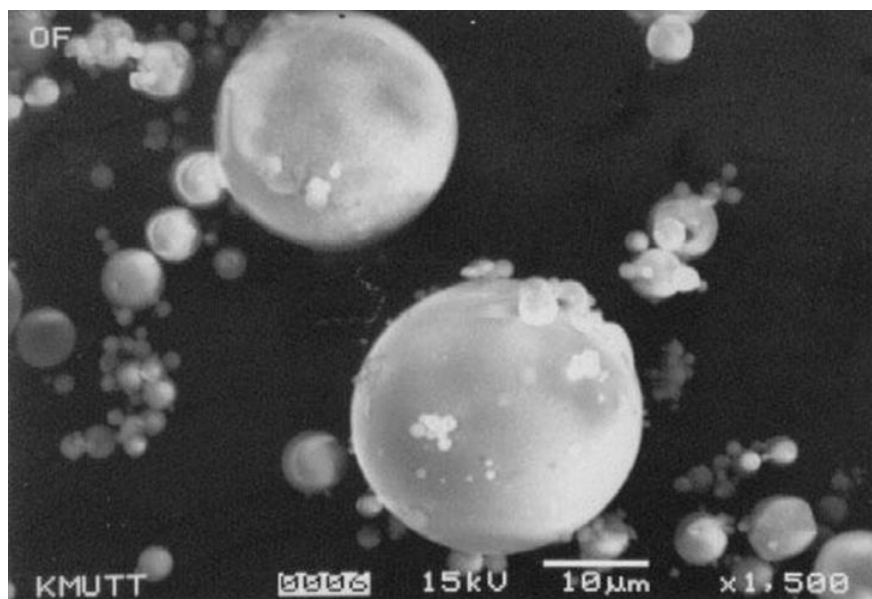
ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นผงละเอียดและมีสีเทา ส่วนลักษณะทางกายภาพของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปางพบว่า มีลักษณะเป็นฝุ่นละเอียดและมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีสีน้ำตาลปนเทา

4.1.1.2 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

เมื่อพิจารณารูปร่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหิน จากภาพที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ แต่ละอนุภาคมีลักษณะเหลี่ยมมุมที่ไม่เหมือนกัน และอนุภาคจะมีหลายขนาดปะปนกัน (ดังรูป 4.1) ส่วนเถ้าถ่านหินแม่เมาะพบว่า อนุภาคมีลักษณะทรงกลม ผิวเรียบ มีขนาดเล็กและใหญ่กระจายอยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากการเผาถ่านหินด้วยเตาแบบ พูลเวอร์ไรท์ (Pulverized Coal Combustion) ซึ่งใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,100 °ซ ในการเผาไหม้ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงมาก ทำให้เถ้าถ่านหินเกิดการหลอมเหลวจนเป็นทรงกลมตัน (ดังรูป 4.2)



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 4.2 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

4.1.1.3 ความละเอียด

เมื่อพิจารณาความละเอียดของวัสดุประสานที่ได้ใช้ในการศึกษาครั้งนี้โดยการหาปริมาณอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) พบว่า เถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีปริมาณอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 32 เห็นได้ว่าปริมาณอนุภาคของ เถ้าถ่านหินแม่เมาะ ที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดไว้ คือไม่เกินร้อยละ 34 ซึ่งสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ ซึ่งความละเอียดที่มากจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซ

ลานเกิดขึ้นได้เร็วและสมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งจะทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีการพัฒนากำลังอัดที่ดี และมีแนวโน้มในการต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงได้ดีขึ้น

4.1.1.4 ความถ่วงจำเพาะ

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ปกติของ ปูนซีเมนต์ คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 ส่วนเถ้าถ่านหินแม่เมาะมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

ตัวอย่าง	ความถ่วงจำเพาะ	ร้อยละข้างตะแกรงเบอร์ 325
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	3.13	-
เถ้าถ่านหิน	2.23	32

4.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหิน พบว่า ผลรวมของออกไซด์หลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) เท่ากับร้อยละ 96.03 มาตรฐาน ASTM C 150 กำหนดว่า ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ต้องไม่เกินร้อยละ 4.0 ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องไม่เกินร้อยละ 3.0 และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องไม่เกินร้อยละ 3.0 ซึ่งพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่นำมาใช้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดทั้งหมด

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน พบว่า ผลรวมของออกไซด์หลักของเถ้าถ่านหิน ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) เท่ากับร้อยละ 72.51 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.07 สามารถจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

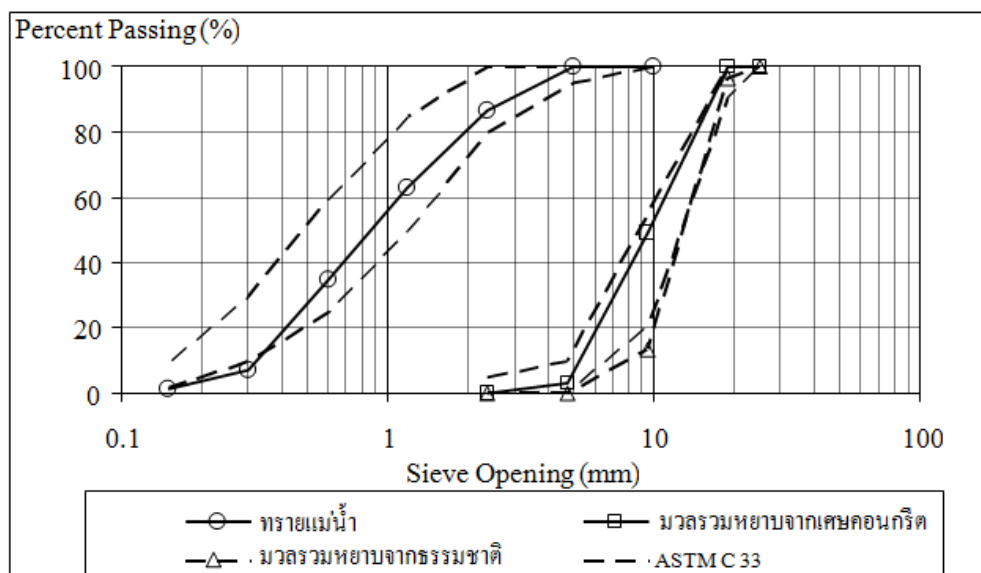
องค์ประกอบทางเคมี(ร้อยละ)	วัสดุประสาน	
	ปูนซีเมนต์ประเภท 1	เถ้าถ่านหิน
Silicon Dioxide, SiO ₂	21.52	36.02
Aluminum Oxide, Al ₂ O ₃	3.56	20.58
Iron Oxide, Fe ₂ O ₃	4.51	15.91
Calcium Oxide, CaO	66.71	18.75
Magnesium Oxide, MgO	1.06	-
Sodium Oxide, Na ₂ O	0.12	0.69
Potassium Oxide, K ₂ O	0.24	1.69
Sulfur Trioxide, SO ₃	2.11	2.24
Loss On Ignition, LOI	1.74	0.07
Tricalcium Silicate, C ₃ S	56.50	-
Dicalcium Silicate, C ₂ S	17.01	-
Tricalcium Aluminate, C ₃ A	9.23	-
Tetracalcium Aluminoferrite, C ₄ AF	9.62	-

4.2 สมบัติของมวลรวมจากเศษคอนกรีต

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตและมวลรวมละเอียด ที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ดังตารางที่ 4.3 พบว่ามวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีสมบัติทางกายภาพ ที่ส่งผลให้คุณภาพดีเยี่ยมกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติค่อนข้างชัดเจน ได้แก่ มีการดูดซึมน้ำที่สูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติค่อนข้างมาก ซึ่งผลดังกล่าวทำให้คอนกรีตมีการดูดซึมน้ำมาก ความพรุนสูง ความคงทนและกำลังอัดลดลงได้ นอกจากนี้ พบว่ามวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีความแข็งแรงจากการทดสอบการขัดสีดีเยี่ยมกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ ทำให้คอนกรีตที่ผสมมวลรวมจากเศษคอนกรีตมีโอกาสที่จะเกิดการสึกกร่อนจากการใช้งานได้สูง โดยเฉพาะงานที่มีการขัดสี ผิวหน้า เช่น ผิวถนน รางระบายน้ำ โครงสร้างทางชลศาสตร์ เป็นต้น

ตารางที่ 4.3 สมบัติของมวลรวม

คุณสมบัติ	มวลรวมละเอียด	มวลรวมหยาบ จากธรรมชาติ	มวลรวมหยาบ จากเศษคอนกรีต
โมดูลัสความละเอียด	2.74	6.89	6.42
ความถ่วงจำเพาะ	2.62	2.73	2.44
การดูดซึม (ร้อยละ)	0.91	0.45	4.92
ความหนาแน่น (กก./ม ³)	1725	1650	1476
ช่องว่าง (%)	33.9	39.3	39.1



รูปที่ 4.3 ขนาดคละของมวลรวมจากเศษคอนกรีต

4.3 สมบัติของน้ำทะเล

จากการเก็บตัวอย่างน้ำทะเลบริเวณที่เข้ตัวอย่างคอนกรีตด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา พบว่า น้ำทะเลมีลักษณะใส ไม่มีสี มีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9-8.2 ส่วนสารประกอบที่ปะปนในน้ำทะเล จะเห็นได้ว่า มีค่าอยู่ในระดับใกล้เคียงกับทะเลทั่วไป คือ ปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000-19,000 มก./ล. ส่วนซัลเฟตระหว่าง 2,200-2,600 มก./ล. จากการทดสอบพบว่าปริมาณคลอไรด์มากกว่าซัลเฟต ประมาณ 8 เท่า โดยปริมาณคลอไรด์ที่มีในน้ำทะเลส่วนใหญ่จะเป็นโซเดียมคลอไรด์ประมาณร้อยละ 90 และอีกประมาณร้อยละ 10 เป็นแมกนีเซียมคลอไรด์ โดยผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำทะเลที่ช่วงเวลาต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.4 จากข้อกำหนดของ ACI 318-05 ที่ระบุว่า คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำที่มีซัลเฟตละลายอยู่ในปริมาณ 1,500 ถึง 10,000 มก./ล. ถือว่าคอนกรีตอยู่

ในสภาวะที่อาจเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตอย่างรุนแรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำทะเลในบริเวณด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา ส่งผลให้คอนกรีตอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง ACI จึงแนะนำให้ใช้คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำกว่า 0.45 และมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 310 กก./ซม.² ส่วนคอนกรีตที่เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม ACI จึงเสนอให้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.40 และมีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 350 กก./ซม.² ที่อายุ 28 วัน

โดยทั่วไป ระดับน้ำทะเลบริเวณด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา ขึ้นและลง วันละ 2 รอบ คือ มีระดับสูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตในช่วงเวลาเช้า จากนั้นระดับน้ำเริ่มลดลงในช่วงเวลาบ่ายจนคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง ช่วงเย็นระดับน้ำเริ่มเพิ่มสูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตอีกครั้ง และลดระดับลงในเวลากลางคืน ซึ่งในแต่ละฤดูกาล เวล่าน้ำขึ้น-ลง อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปบ้าง เช่น ช่วงฤดูหนาว ระดับน้ำที่สูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตจะมีระยะเวลายาวนานกว่าปกติ และลดระดับลงเพียงเล็กน้อย ทำให้บางครั้งคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งในช่วงเวลาสั้นมาก หรือไม่ได้อยู่ในสภาพแห้งเลย

ตารางที่ 4.4 สมบัติของน้ำทะเลบริเวณ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี

Parameters	เมษายน 2004	กุมภาพันธ์ 2005	พฤษภาคม 2008	กันยายน 2010	เมษายน 2012	เมษายน 2016
ครอไรด์, Cl ⁻ (mg/l)	16,000	18,000	17,500	18,120	18,910	18,322
ซัลเฟต, SO ₄ ²⁻ (mg/l)	2,500	2,200	2,300	2,250	2,610	2,598
ค่า pH	8.2	8.2	8.1	8.2	8.1	8.0

4.4 สภาพผิวหน้าของคอนกรีต

ภายหลังจากการเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี โดยเป็นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.55 แต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแทนที่เถ้านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่า สีของก้อนตัวอย่างส่วนใหญ่จะแตกต่างกันออกไปหลังจากแช่ในน้ำทะเลมาเป็นเวลานาน มีสีเขียวของตะไคร่น้ำเป็นบางจุด และ ผิวของตัวอย่างบางก้อนพบ หอย เปรียง ติดอยู่ตามผิวคอนกรีต บริเวณขอบของก้อนตัวอย่างถูกน้ำกัดเซาะออกไป (แสดงดังรูปที่ 4.4) แต่โดยภาพรวมพบว่าการกัดกร่อนที่ผิวทำให้เกิดความเสียหายยังไม่ปรากฏซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำลายทางกายภาพจาก คลื่น กรวด ทราบ และการทำลายทางชีวภาพจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เช่น หอย เปรียง ตะไคร่น้ำ ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อตัวอย่างคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี



รูปที่ 4.4 สภาพผิวคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

4.5 กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต

พิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ซึ่งเป็นไปตามหลักทั่วไปเหมือนคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีต พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเถ้าถ่านหินมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลระยะต้น ถึงแม้จะใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตก็สามารถให้กำลังอัดที่สูงในเวลา 28 วัน ได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Somna, et al., 2012) ที่พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินที่บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 20 สามารถทำให้กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่อายุ 28 วัน สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน ส่วนการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง และลดลงต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน นอกจากนี้การใช้วัสดุปอชโซลานชนิดอื่นที่มีความละเอียดสูง ก็สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดย รัฐพล สมณา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554) พบว่า การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดผสมในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 20 ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าขานอ้อย ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาปอชโซลานระหว่างซิลิกาและอลูมินาในวัสดุปอชโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลชัดเจนต่อการเพิ่มกำลังอัดในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ซึ่งสามารถชดเชยข้อด้อยของคอนกรีตที่ใช้มวล

รวมจากเศษคอนกรีตได้ เมื่อพิจารณาความเหมาะสมของกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตเพื่อใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล พบว่า ส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่า 350 กก./ชม.² ตามที่ ACI 363.2R – 98 กำหนดไว้ได้แก่ ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.4 และแทนที่เถ้าถ่านหินไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานซึ่งมีความเหมาะสมทางคุณสมบัติเชิงกล เพื่อใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล อย่างไรก็ตามความคงทนของคอนกรีตที่ใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลต้องพิจารณาร่วมกับสมบัติด้านความคงทนด้วย

ตารางที่ 4.5 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

ส่วนผสม	กำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน (กก./ชม ²)			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
40FR00	379	367	404	383
40FR15	328	489	326	381
40FR25	378	347	518	414
40FR35	306	413	321	357
40FR50	353	334	261	316
45FR00	280	327	305	304
45FR15	364	371	384	373
45FR25	336	309	307	317
45FR35	2678	295	292	285
45FR50	269	273	268	270
50FR00	296	263	297	285
50FR15	309	324	297	310
50FR25	300	301	313	305
50FR35	296	275	274	282
50FR50	262	268	272	267

4.6 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

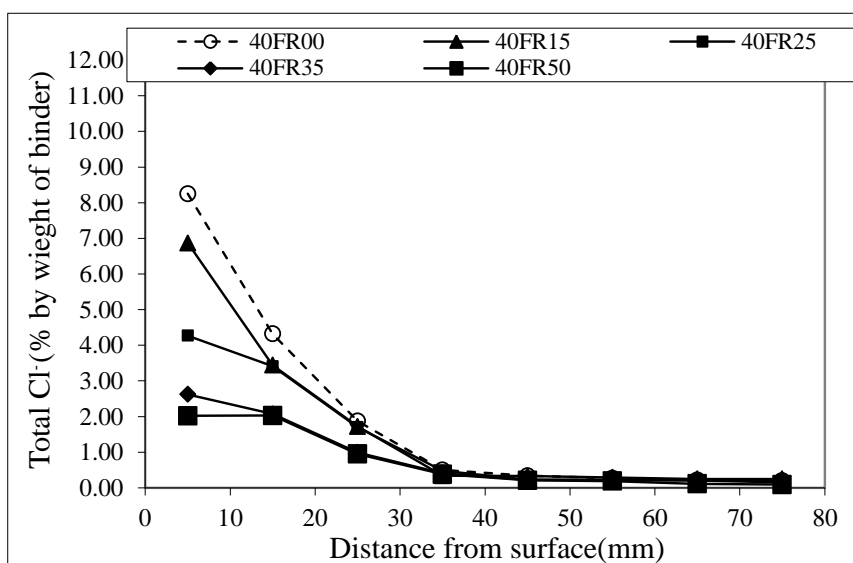
4.6.1 ผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ดังรูปที่ 4.5(ก), 4.5(ข), 4.5(ค)

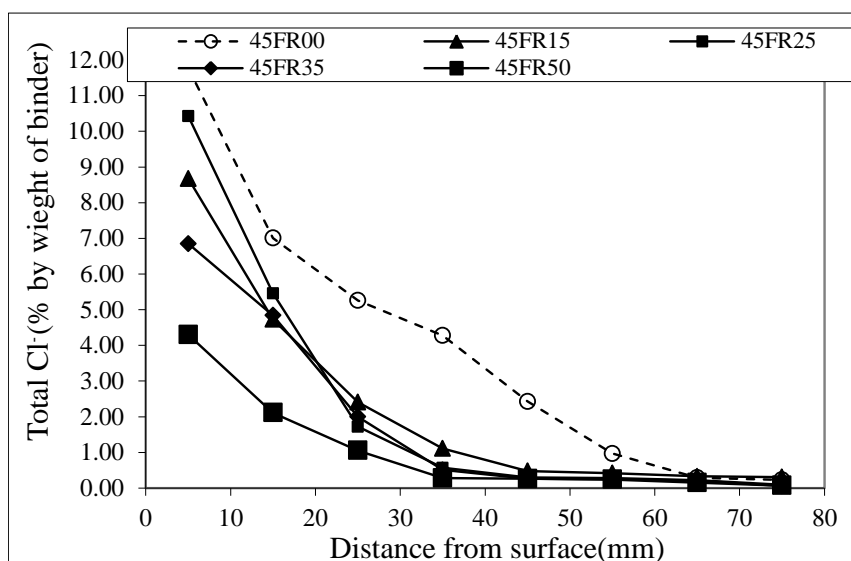
ตามลำดับ พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต มีผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลลดลงต่ำกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ใช้เถ้าถ่านหินอย่างชัดเจน โดยการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี มีแนวโน้มลดลง โดยเห็นผลชัดเจนที่ระดับความลึกมากขึ้น โดยเฉพาะในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงกว่า 0.4 ดังรูปที่ 4.5(ข) และ 4.5(ค) โดยคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึก 45 มม. เท่ากับ ร้อยละ 2.43, 0.48, 0.3, 0.26 และ 0.26 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระดังรูปที่ 4.6 พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดดังที่กล่าวมาข้างต้นนี้ โดยการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์มีแนวโน้มลดลง และมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เช่นในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.45 และ 0.50 เมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระดับความลึก 45 มม. เท่ากับร้อยละ 0.32, 0.17, 0.15, 0.11, 0.10 และ 1.8, 0.24, 0.15, 0.16, 0.11 และ 2.02, 0.45, 0.29, 0.28, 0.19 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหิน ส่งผลดีต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด และปริมาณคลอไรด์อิสระอย่างชัดเจน ในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และทุกระดับความลึก แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างออกไซด์ของซิลิกา และอลูมินาที่เป็นองค์ประกอบหลักในเถ้าถ่านหินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีต (Neville, 1996) ให้ผลดีต่อคุณสมบัติทางด้านความคงทน และลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ โดยการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินจะส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจะช่วยลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่น และมีความทึบน้ำมากขึ้น และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมาของ Chalee et al., 2010 ที่มีการศึกษาในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินในการปรับปรุงสมบัติความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตให้ผลต่อการต้านทานคลอไรด์ค่อนข้างดี เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตปกติจะมีความพรุนสูง เพราะคุณภาพของมวลรวมที่ไม่ดี จึงส่งผลให้ คุณภาพของคอนกรีตด้อยกว่ามวลรวมจากธรรมชาติค่อนข้างชัดเจน การใช้เถ้าถ่านหินในการปรับปรุงสมบัติของเพสต์ให้ดีขึ้น เพื่อชดเชยสมบัติของมวลรวมที่ไม่ดี โดยเห็นผลชัดเจนว่ากลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินมีปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

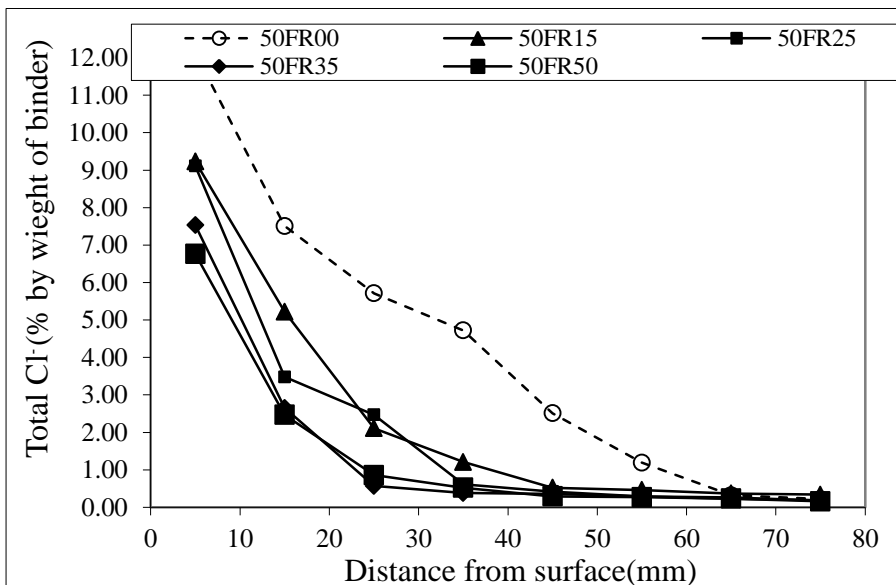
ลดลงจากกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่มีการใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเล จะมีกลไกการทำลายทั้งทางกายภาพ(เช่น คลื่นกระแทก , กรวดทราย , หอย , เพรียง , ตะไคร่น้ำ) และทางเคมี(ได้แก่ ซัลเฟต และคลอไรด์ เป็นหลัก) การเลือกใช้คอนกรีตจำเป็นต้องมีสมบัติความคงทนที่ดี(มีความทับน้ำ ลดการทำลายซัลเฟต) ควบคู่กับสมบัติเชิงกล(มีกำลังอัดสูง) จึงจะสามารถใช้งานได้ดี ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้ผลด้านความคงทนและสมบัติเชิงกลเป็นไปตามข้อกำหนดของ ACI ที่กำหนดสมบัติของคอนกรีตให้สามารถใช้ได้ในสิ่งแวดล้อมทะเล



(ก) W/B =0.40

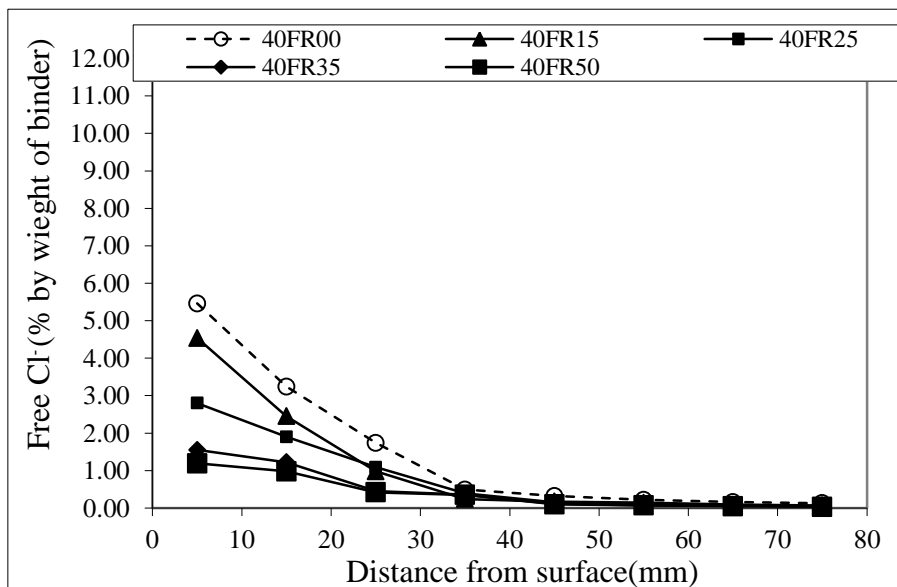


(ข) W/B =0.45

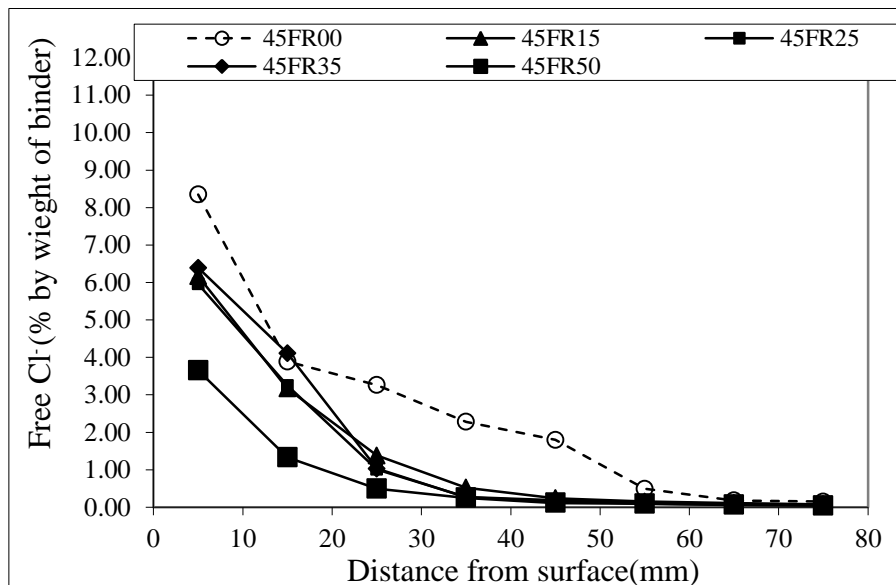


(ค) W/B = 0.50

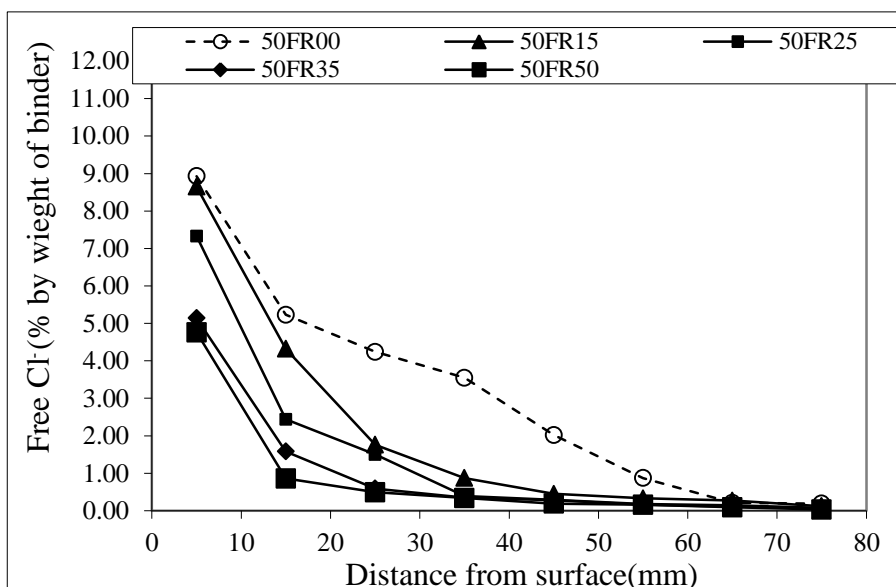
รูปที่ 4.5 ผลของเส้นใยต่อการแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ผสมเส้นใยหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 5 ปี



(ง) W/B = 0.40



(ข) W/B = 0.45



(ค) W/B = 0.50

รูปที่ 4.6 ผลของเถ้านหินต่อปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินหลัง
แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

4.6.2 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณ
คลอไรด์อิสระในคอนกรีต

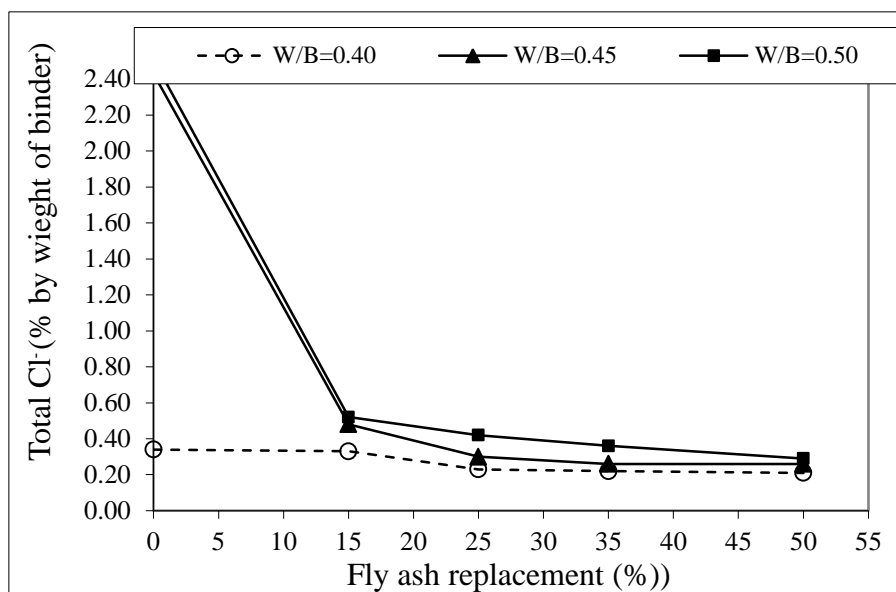
เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดใน
คอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี ที่ระดับความลึกต่างๆ พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ส่งผล
ให้การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกต่างๆลดลง ซึ่งเป็นไปตามหลักเทคโนโลยีคอนกรีต

ทั่วไปที่ปริมาณของน้ำลดลง จะส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดและความทึบน้ำมากขึ้น โดยจะเห็นผลชัดเจนที่ระดับความลึกมากขึ้น เนื่องจากระดับความลึกใกล้ผิวหน้าคอนกรีต ได้รับผลกระทบทางกายภาพและทางเคมีค่อนข้างชัดเจนเนื่องจากการกัดเซาะของคลื่น, กรวด, ทราย และการทำลายทางชีวภาพ จึงส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์บริเวณผิวมีความแปรปรวนและไม่สามารถวิเคราะห์แนวโน้มที่ชัดเจนได้ ดังนั้นจะพิจารณาตั้งแต่ความลึกจากผิวคอนกรีตที่ 45, 55 และ 65 มม. ดังรูปที่ 4.7(ก), 4.7(ข) และ 4.7(ค) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกจากผิวคอนกรีต 45 มม. ดังรูปที่ 4.7(ก) พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ที่ผสมเถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 0.23, 0.30 และ 0.42 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ และที่ระดับความลึกจากผิวคอนกรีต 65 มม. ดังรูปที่ 4.7(ค) ในตัวอย่างเดียวกัน (คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ที่ผสมเถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) มีการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 0.22, 0.22 และ 0.26 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ และเมื่อพิจารณา คอนกรีตแต่ละอัตราส่วนผสมและความลึกต่างๆ พบว่าแนวโน้มการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ส่งผลให้สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตได้ดีขึ้น

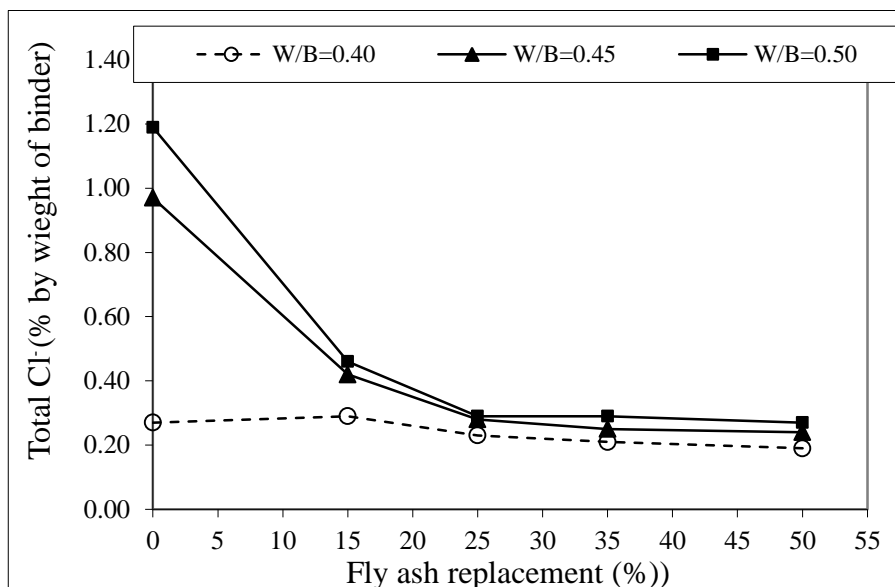
รูปที่ 4.8 แสดงผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี พบว่าแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด โดยพิจารณาตามลำดับความลึกจากผิวคอนกรีตที่ 45, 55 และ 65 มม. ดังรูปที่ 4.8(ก), 4.8(ข) และ 4.8(ค) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกจากผิวคอนกรีต 45 มม. ดังรูปที่ 4.8(ก) พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ที่ผสมเถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีปริมาณคลอไรด์อิสระเท่ากับร้อยละ 0.15, 0.19 และ 0.29 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานตามลำดับ และที่ระดับความลึกจากผิวคอนกรีต 65 มม. ดังรูปที่ 4.8(ค) ในตัวอย่างเดียวกัน (คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ที่ผสมเถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 0.08, 0.09 และ 0.14 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานตามลำดับ

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุที่ต่ำกว่าจะมีปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์ที่น้อยกว่า เป็นผลจากการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ ส่งผลให้คอนกรีตมีรูพรุนน้อยลง ความทึบน้ำสูง และยังช่วยลดปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง ปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ลดลง กล่าวคือ เมื่อคอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น น้ำหรือ

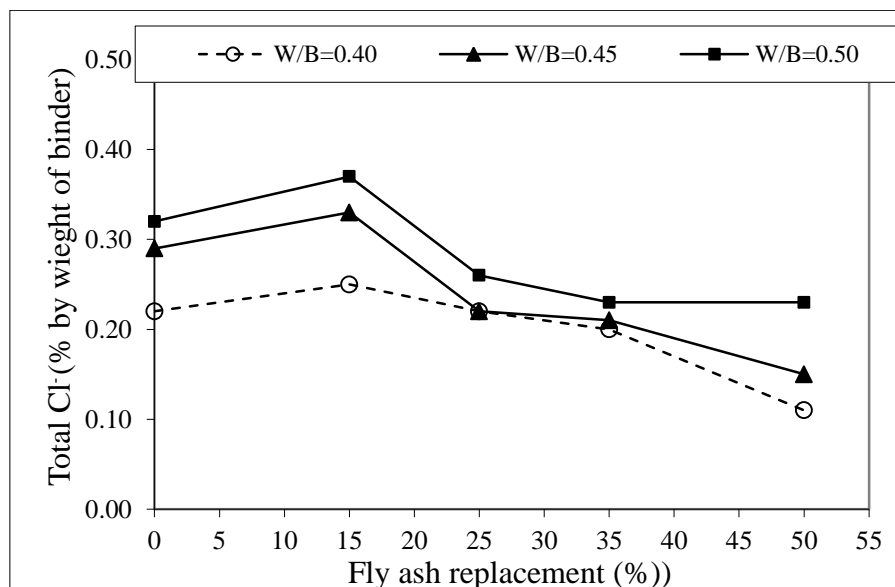
สารประกอบคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้น โดยจากการศึกษาครั้งนี้พบว่า การลดปริมาณน้ำในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตส่งผลต่อการต้านทานคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เช่น เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึก 55 มม. เมื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจาก 0.5 เป็น 0.4 ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินลดลงเท่ากับ ร้อยละ 1.19 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีต 50FR00 เป็น 0.34 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีต 40FR00 ขณะที่ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินสูงถึงร้อยละ 50 มีผลให้ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกเดียวกันลดลงแค่ร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีต 50FR50 เป็น 0.19 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีต 40FR50 ผลดังกล่าวเกิดจากความที่บ น้ำในคอนกรีตธรรมดาขึ้นกับปริมาณน้ำเป็นหลัก กล่าวคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ต่ำลง กำลังสูงขึ้น ความพรุนในคอนกรีตลดลง และสามารถต้านทานคลอไรด์ได้ดีขึ้น ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้า ถ่านหินความที่บ น้ำของคอนกรีต ขึ้นกับสมบัติของเถ้าถ่านหินที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งทำให้ คอนกรีตมีความที่บ น้ำมากขึ้นด้วย (Chalee and Jaturapitakkul, 2009)



(ก) ความลึก 45 มม.

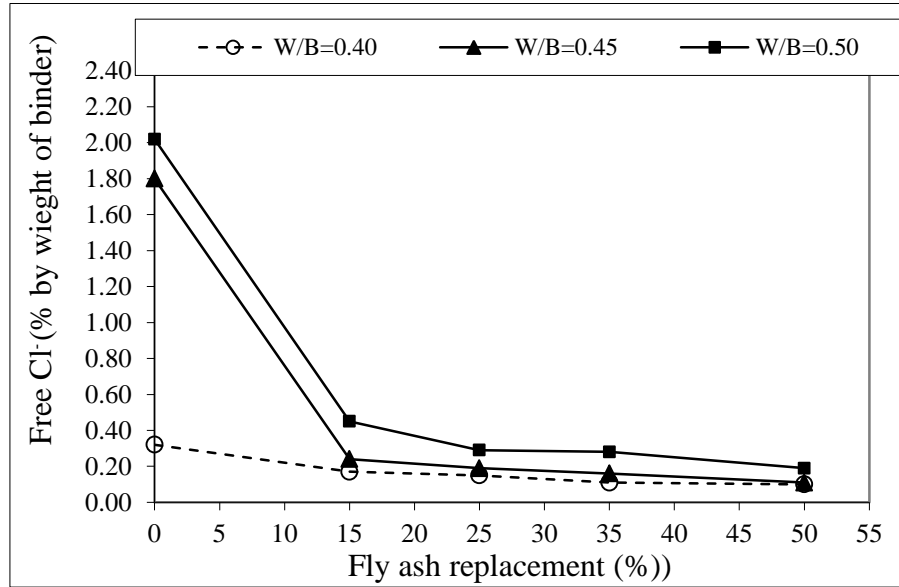


(ข) ความลึก 55 มม.

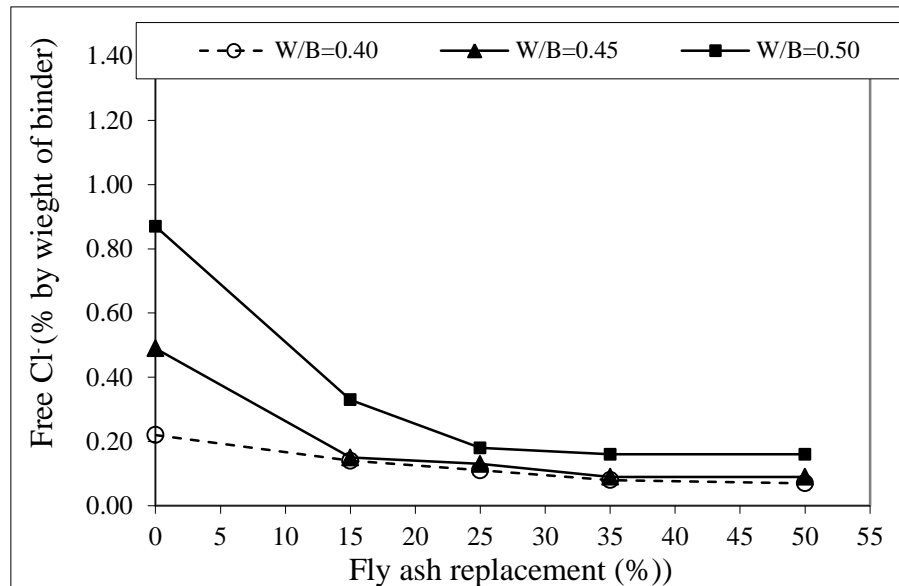


(ค) ความลึก 65 มม.

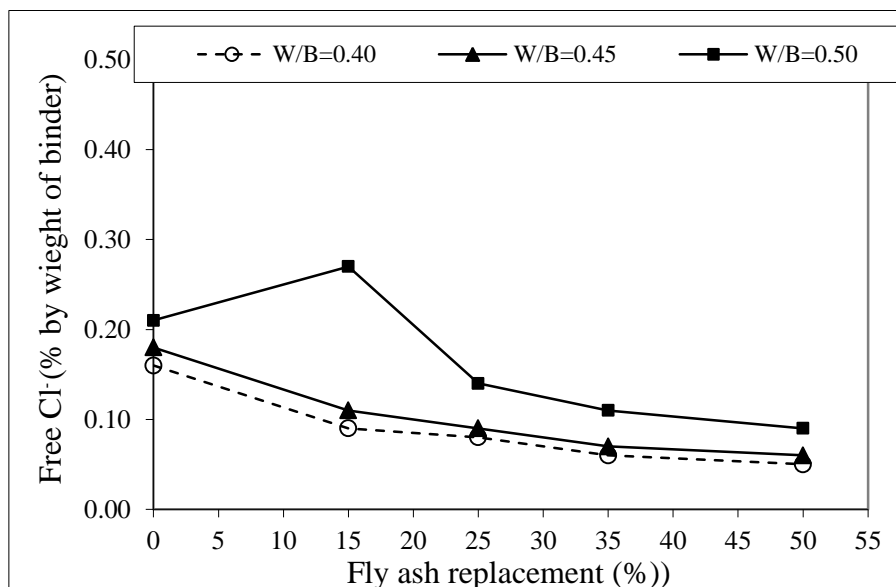
รูปที่ 4.7 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี



(ก) ความถี่ 45 มม.



(ข) ความถี่ 55 มม.



(ค) ความลึก 65 มม.

รูปที่ 4.8 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี

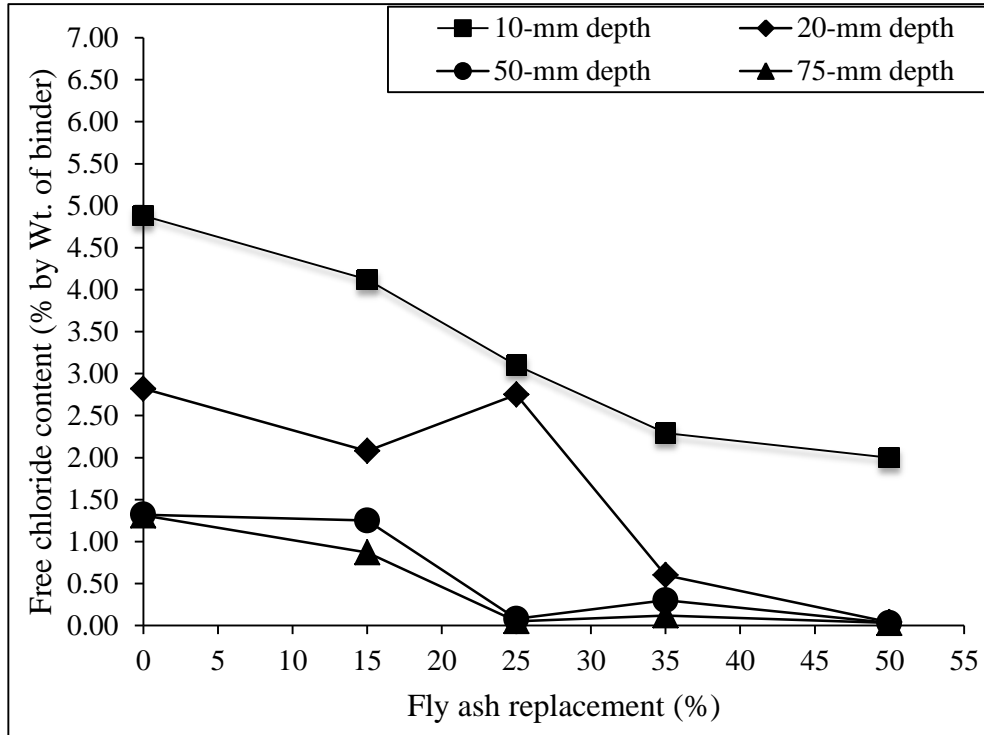
4.6.3 ปริมาณคลอไรด์อิสระในตำแหน่งเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ตำแหน่งเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.45 และ 0.50 ดังแสดงดังรูปที่ 4.9 (ก), 4.9 (ข) และ 4.9 (ค) ตามลำดับ ที่เป็นปริมาณคลอไรด์ที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาโดยตรงพบว่าการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้น โดยภาพรวมนั้นส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระลดลงอย่างเห็นได้ชัด ตามความลึกที่มากขึ้น เช่น พิจารณาระยะหุ้ม 50 มม. ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ที่ร้อยละแทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีปริมาณคลอไรด์อิสระเท่ากับร้อยละ 1.32, 1.25, 0.08, 0.30 และ 0.03 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ จะเห็นว่าโดยภาพรวมปริมาณคลอไรด์จะลดลงตามการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้น แสดงให้เห็นว่าผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ให้ผลชัดเจนที่ทำให้คอนกรีตมีความชื้นน้ำและลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้อย่างมาก

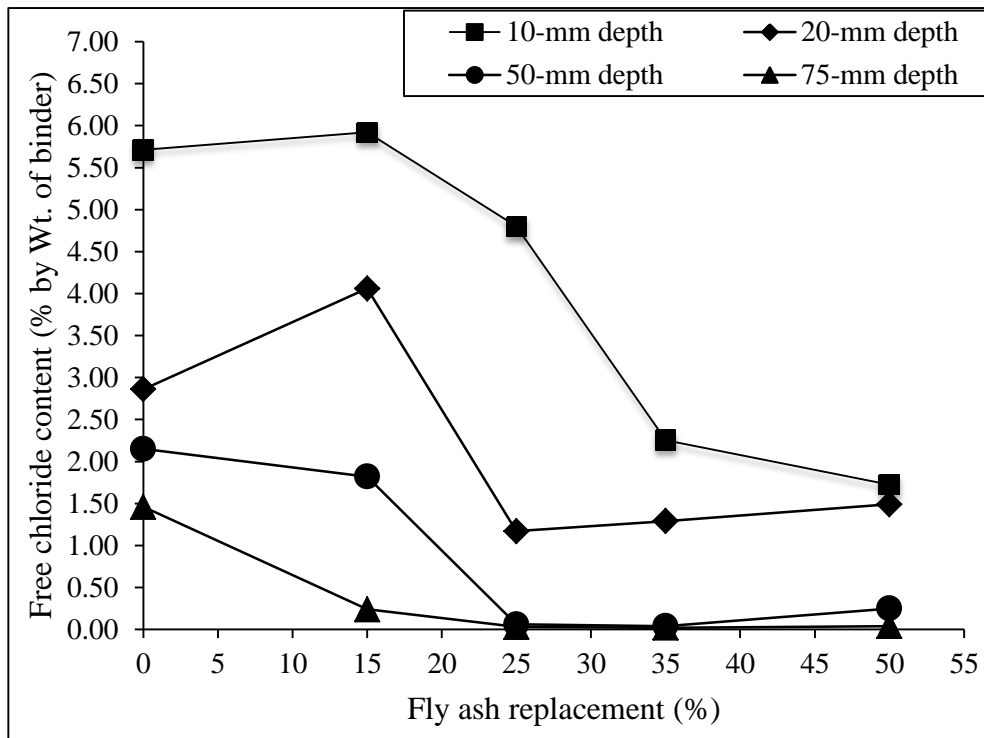
เมื่อมาพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ตำแหน่งเหล็กเสริม พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลงมีผลต่อการลดปริมาณคลอไรด์อิสระ โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินดังที่กล่าวมาข้างต้น และจะ

เห็นผลได้ชัดเจนที่ระยะหุ้มที่มากขึ้น เพราะในระหุ้มที่ น้อยๆจะอยู่ใกล้ผิวหน้าคอนกรีต ได้รับผลกระทบทางกายภาพและทางเคมีมากเนื่องจากการกัดเซาะ ปริมาณคลอไรด์จึงมีความแปรปรวนและไม่สามารถวิเคราะห์แนวโน้มที่ชัดเจนได้ดังแสดงในรูป 4.10 เมื่อพิจารณาความลึกที่มากขึ้นที่ระยะหุ้ม 50 มม. พบว่า ปริมาณคลอไรด์ลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ที่ผสมเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีปริมาณคลอไรด์อิสระเท่ากับร้อยละ 0.08, 1.82 และ 2.27 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ และที่ผสมเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีปริมาณคลอไรด์อิสระเท่ากับร้อยละ 0.03, 0.25 และ 0.76 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ

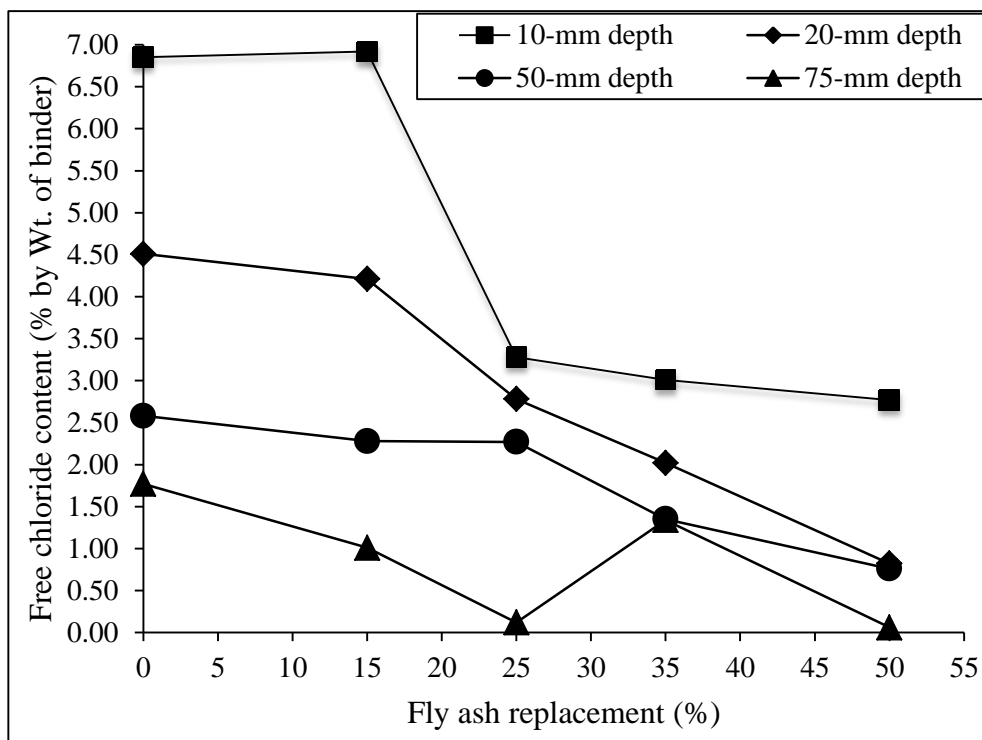
จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุที่ต่ำกว่ามีปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์ที่น้อยกว่า เป็นผลจาก การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูง ลดการซึมผ่านของน้ำ และยังทำให้คอนกรีตเนื้อแน่นขึ้นเมื่อคอนกรีตมีเนื้อแน่นมากขึ้น น้ำหรือสารประกอบคลอไรด์ที่สามารถเข้าไปในเนื้อคอนกรีตก็จะแทรกซึมเข้าไปได้ยากขึ้น และการลดปริมาณน้ำในคอนกรีตส่งผลต่อการต้านทานคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ซึ่งผลนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกับการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น



(n)W/B = 0.40

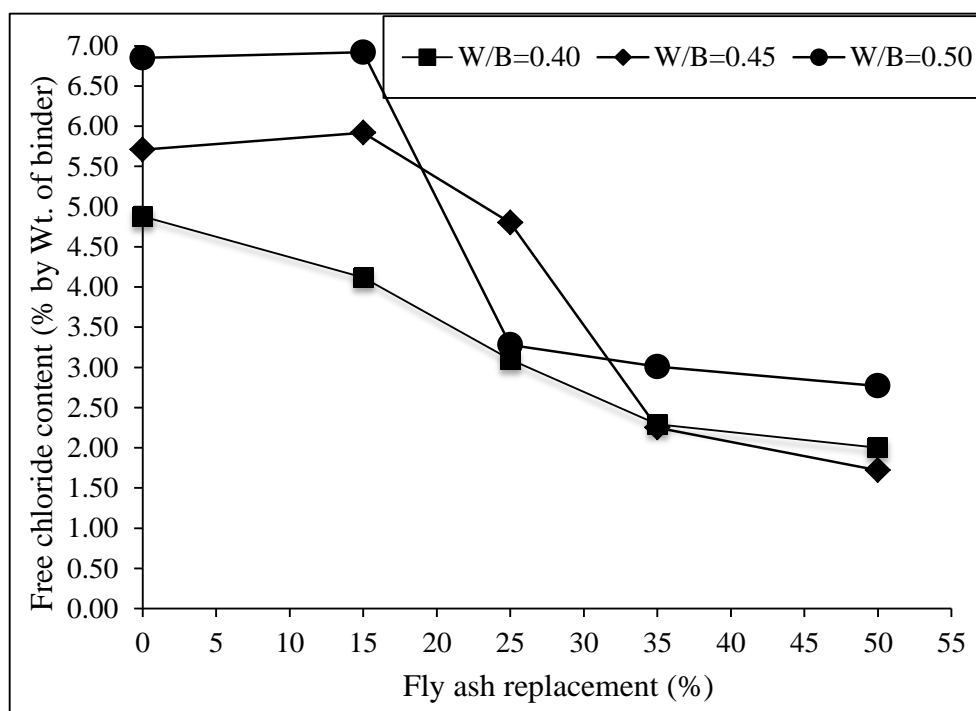


(u)W/B = 0.45

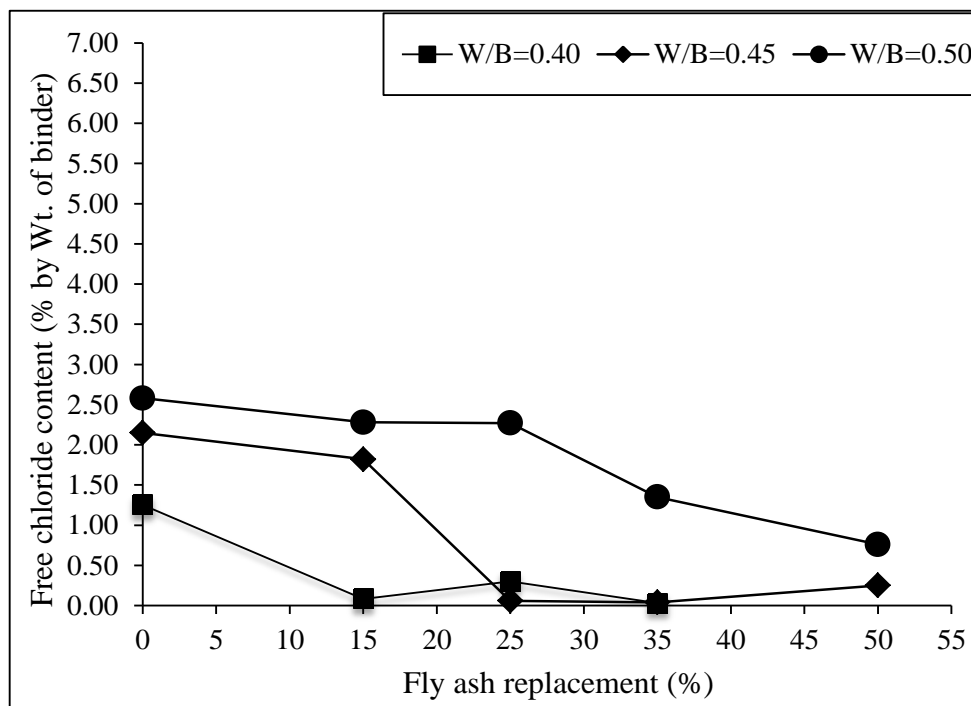


(ค)W/B=0.50

รูปที่ 4.9 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูค้ำอิสระในคอนกรีตที่ตำแหน่งเหล็กเสริมหลัง
แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี



รูปที่ 4.10 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ตำแหน่งเหล็ก
เสริมที่ฝังที่ระยะ 10 มม. หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี



รูปที่ 4.11 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ตำแหน่งเหล็กเสริมที่ฝังที่ระยะ 50 มม. หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

4.7 การกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต

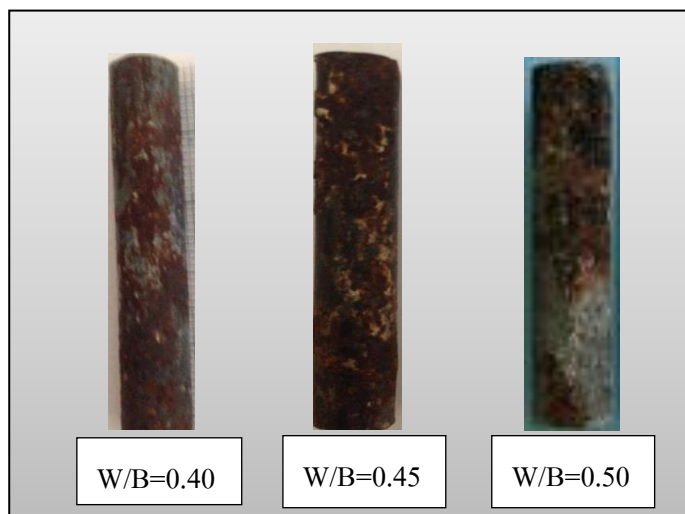
หลังจากแช่คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี ได้นำแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่ 10 , 20 , 50 และ 75 มิลลิเมตร เพื่อวัดพื้นที่การเกิดสนิม และถ่ายรูปเพื่อศึกษาลักษณะการเกิดสนิมโดยแสดงปริมาณการเกิดสนิมเหล็กดังตารางที่ 4.6 และเก็บตัวอย่างคอนกรีตบริเวณรอบเหล็กที่ฝัง มาทำการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ โดยมีน้ำเป็นตัวทำละลายดังที่กล่าวมาข้างต้น

รูปที่ 4.11 แสดงการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต ซึ่งเห็นได้ชัดว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสานเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณการเกิดสนิมก็มากขึ้นด้วย เช่นที่ระยะหุ้มเหล็ก 50 มม. โดยที่ W/B เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 มีค่าร้อยละการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตธรรมดาเท่ากับร้อยละ 9.5 และ 67.5 ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับปริมาณคลอไรด์อิสระตามที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อพิจารณาผลของเถ้านหินต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต พบว่าการใช้เถ้านหินส่งผลให้การเกิดสนิมในเหล็กลดลงต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้านหินได้อย่างชัดเจน เช่น ที่ระยะหุ้มเหล็ก 50 มม. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่ผสมเถ้านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35, และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีร้อยละของพื้นที่การเกิดสนิมเหล็กเท่ากับ 67.5, 1.5, 6.8, 1.4, และ 0.5 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น สามารถลด

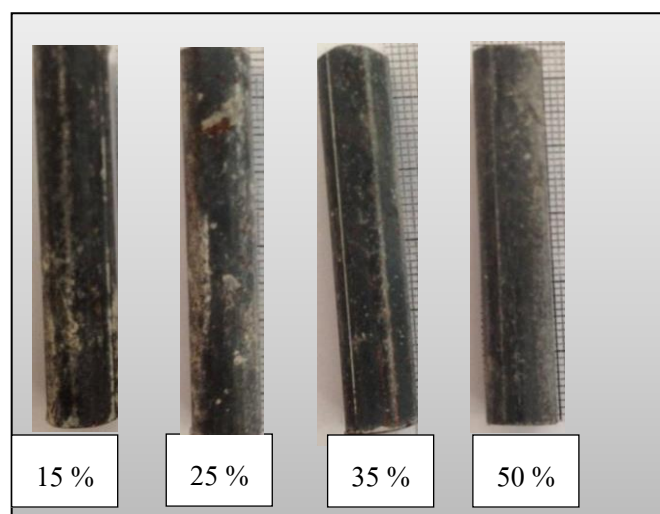
การแทรกซึมของคลอไรด์ที่จะส่งผลทำให้เกิดสนิมในเหล็กลดลงได้ เนื่องมาจากปฏิกิริยาดังกล่าวช่วยลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตที่ได้มาจากปฏิกิริยาไฮดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำได้ และยังมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งจะลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลงทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น [48] ลดการซึมผ่านของน้ำ นอกจากนี้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ยังเป็นสารตั้งต้นที่ก่อให้เกิดการทำลายเนื่องมาจากซัลเฟตในน้ำทะเล โดยจะทำให้เกิดยิปซัมที่ละลายน้ำได้และส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหาย ดังนั้นปฏิกิริยาปอซโซลานจึงมีส่วนช่วยอย่างมาก ในการทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ และลดการซึมผ่านของสารเคมี ที่จะเข้าไปทำอันตรายกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลได้อย่างดี

ตารางที่ 4.6 ร้อยละพื้นที่สนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะ 10 , 20 , 50 และ 75 มม.

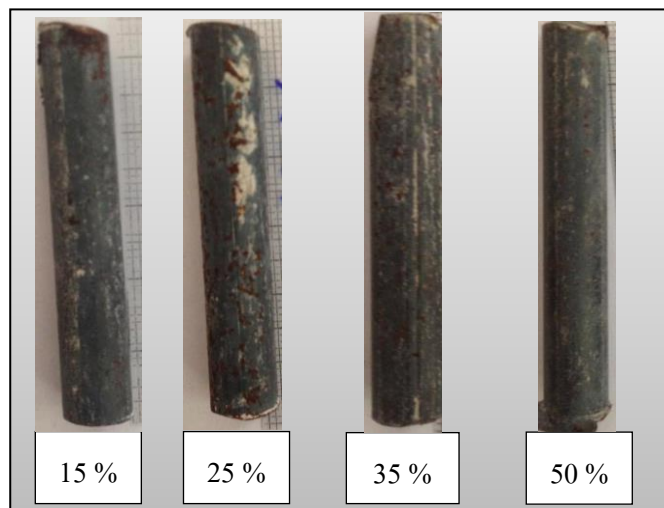
ส่วนผสม	ร้อยละพื้นที่สนิมเหล็ก			
	10 มม.	20 มม.	50 มม.	75 มม.
40FR00	60.3	60.3	9.5	1.0
40FR15	83.2	1.4	0.5	0.6
40FR25	59.6	28.9	4.0	2.3
40FR35	7.0	1.3	1.2	0.4
40FR50	19.3	1.7	0.0	0.0
45FR00	67.5	67.5	40.3	3.0
45FR15	47.0	2.5	1.5	0.5
45FR25	95.3	22.6	6.8	1.0
45FR35	6.4	3.9	1.4	0.4
45FR50	46.0	2.3	0.5	0.3
50FR00	89.0	72.0	65.0	8.0
50FR15	78.0	32.0	10.0	3.0
50FR25	100.0	21.7	6.3	2.2
50FR35	25.7	3.7	2.3	0.5
50FR50	17.7	9.3	6.4	5.0



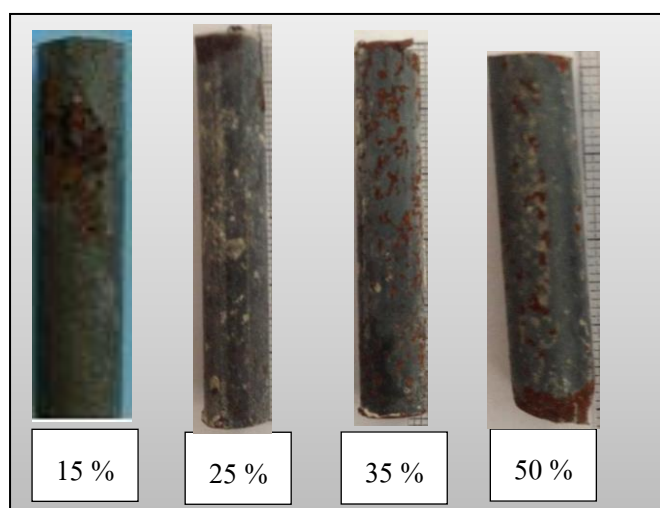
(ก) คอนกรีตธรรมดา



(ข) คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน W/B= 0.40

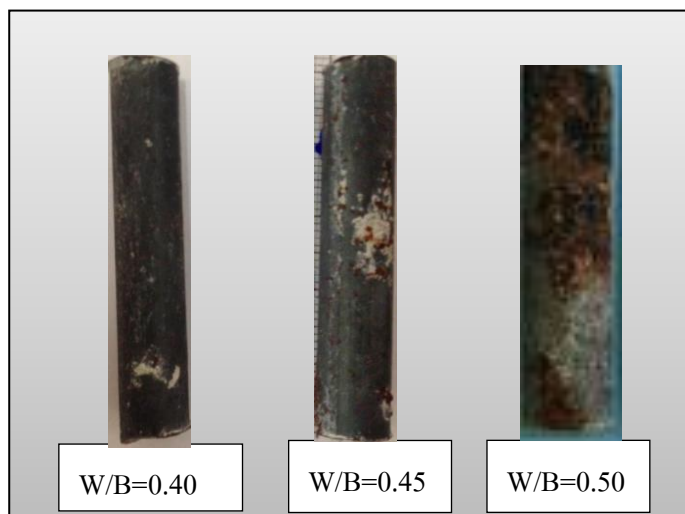


(ค) คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่มี W/B=0.45

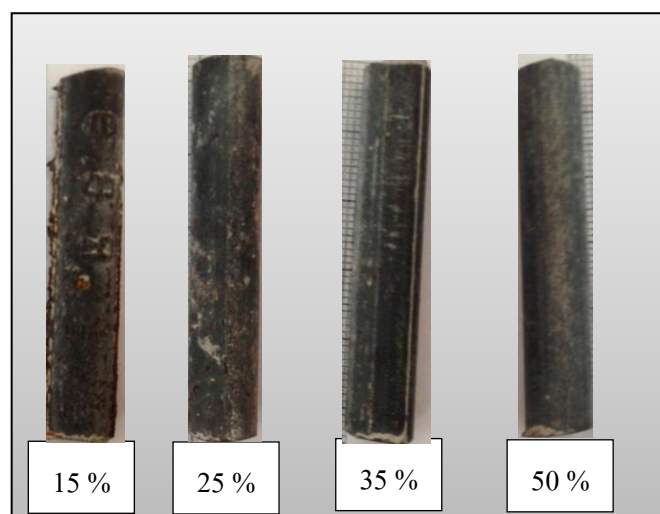


(ง) คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่มี W/B=0.50

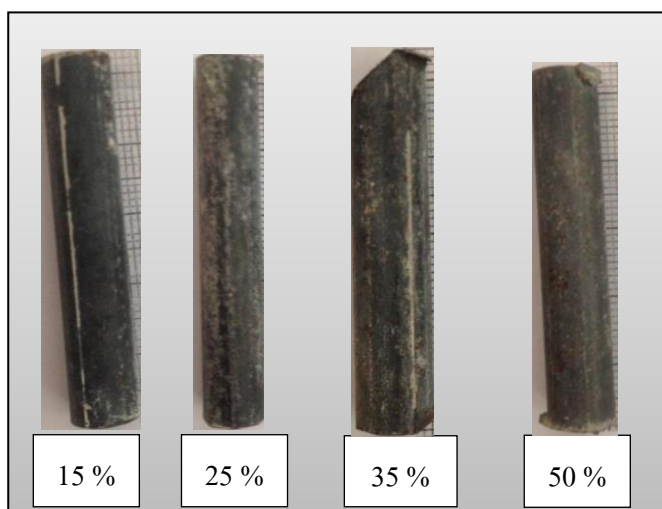
รูปที่ 4.12 การกัดกร่อนเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้ม 50 มม. หลังจากแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นระยะเวลา 5 ปี



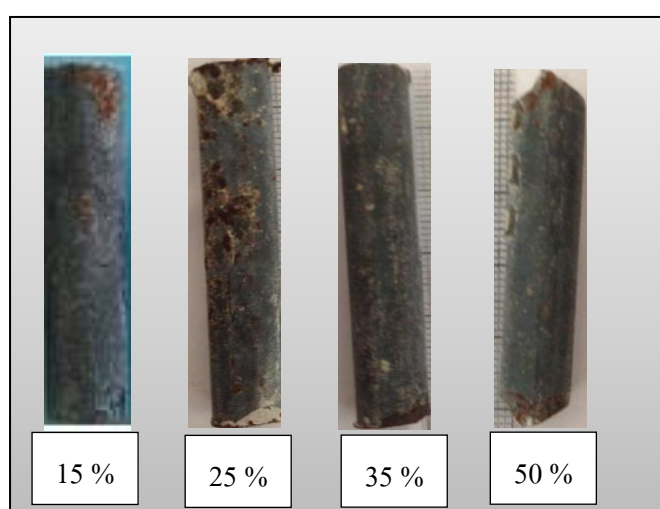
(ก) คอนกรีตธรรมดา



(ข) คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน W/B= 0.40



(ค) คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่มี W/B=0.45



(ง) คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่มี W/B=0.50

รูปที่ 4.13 การกัดกร่อนเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้ม 75 มม. หลังจากแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นระยะเวลา 5 ปี

4.8 ผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษ

คอนกรีตและมวลรวมธรรมชาติภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต และมวลรวมธรรมชาติภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ที่แช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลาที่เท่ากันกับมวลรวมจากเศษคอนกรีต (5 ปี) โดยมีรายละเอียดด้านกำลังอัด และการแทรกซึมของคลอไรด์ดังนี้

4.8.1 กำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.45 และมวลรวมจากธรรมชาติที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่อายุ 28 วันและหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี แสดงดังตารางที่ 4 โดยพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติทุกส่วนผสมมีกำลังอัดที่ อายุ 28 วัน และหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี สูงกว่า 350 กก/ซม² ซึ่งมีความเหมาะสมเชิงกลที่จะใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลตามข้อกำหนดของ ACI 201.2R ส่วนคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 35 เท่านั้นที่มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงกว่า 350 กก/ซม² และกำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มนี้หลังแช่น้ำทะเล 5 ปีลดลงค่อนข้างชัดเจน และต่ำกว่า 350 กก/ซม² ซึ่งอาจไม่มีความเหมาะสมในด้านสมบัติเชิงกลที่ใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล เมื่อพิจารณาผลของมวลรวมต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังรูปที่ 4.14(ก) พบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติมีกำลังอัดสูงกว่ามวลรวมจากเศษคอนกรีตทั้งสองอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานค่อนข้างชัดเจน ถึงแม้ว่ามวลรวมจากเศษคอนกรีตจะใช้ปริมาณน้ำที่ต่ำกว่าและใช้สารลดน้ำเพื่อช่วยในการทำงานได้ แต่กำลังอัดก็ยังต่ำกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า คุณภาพของมวลรวมหยาบมีผลค่อนข้างชัดเจนต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีต เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมจากเศษคอนกรีตที่อายุ 28 วัน พบว่า ให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกล่าวคือ การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติมากกว่ามวลรวมจากเศษคอนกรีต ซึ่งพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน ส่วนคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตร้อยละ 15 โดยน้ำหนักรวบรวมวัสดุประสานมีผลให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน และในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำถึง 0.40 ให้กำลังอัดสูงที่สุด เมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงถึงร้อยละ 25 โดยน้ำหนักรวบรวมวัสดุประสาน ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากกำลังอัดในช่วงต้นของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเป็นหลัก และการลดปูนซีเมนต์ลง โดยการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น ยังมีผลทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ส่วนปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินกับปูนซีเมนต์เริ่มมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตในช่วงหลัง 7 วันเป็นต้นไปและพัฒนากำลังอัดต่อเนื่องในระยะยาว (Chindaprasirt and Jaturapitakkul, 2008) ส่วนในกรณีของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่พบว่า กำลังอัดสูงกว่ากลุ่มควบคุมเมื่อใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักรวบรวมวัสดุประสาน เป็นผลจากเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีลักษณะอนุภาคที่กลมตัน สามารถแทรกช่องว่างในคอนกรีตได้ดี ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและส่งผลให้กำลังอัดสูงกว่ากลุ่มควบคุมได้ (Somna, et al., 2012)นอกจากนั้น

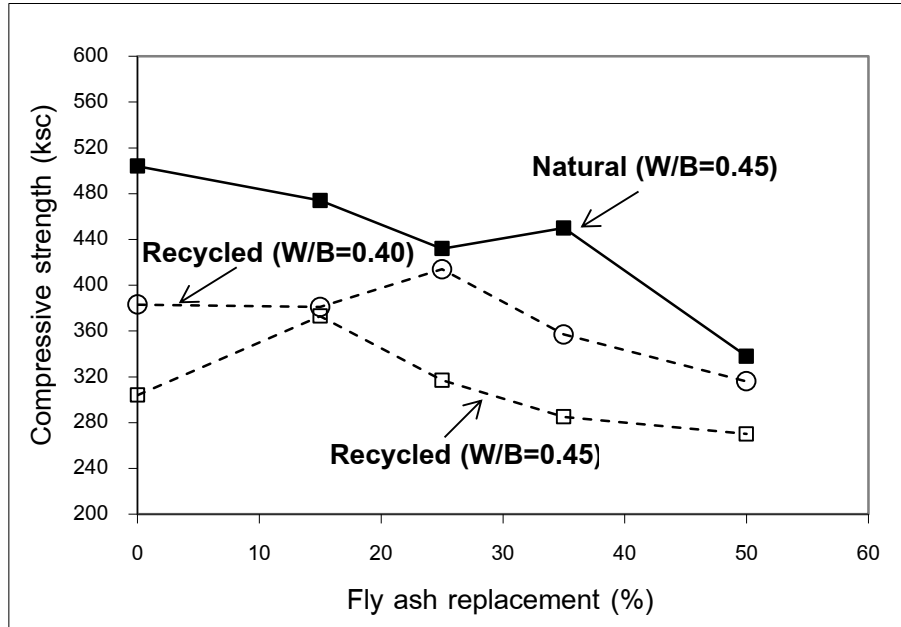
ปฏิบัติการปอซโซลานระหว่างซิลิกาและอลูมินาในเถาถ่านหิน กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิบัติการไฮดรชันยังส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นได้

เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมจากเศษคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลบริเวณชายฝั่งเป็นเวลา 5 ปี ดังตารางที่ 4.7 พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ยังคงให้กำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตทั้งสองอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยรูปที่ 4.14(ข) พบว่า แนวโน้มของกำลังอัดคอนกรีตทั้งสองกลุ่มที่ปริมาณการแทนที่เถาถ่านหินต่างกัน เป็นไปในทิศทางกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน โดยพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลสูงกว่ากลุ่มที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตชัดเจนมากขึ้น เมื่อเทียบกับกำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับการสูญเสียกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลที่อยู่ในรูปร้อยละกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับอายุบ่มคอนกรีต 28 วัน ซึ่งพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหิน ทุกส่วนผสมมีร้อยละกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับ 28 วัน สูงกว่า 100 ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตทุกส่วนผสมมีกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับอายุบ่มคอนกรีต 28 วันต่ำกว่าร้อยละ 90 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ด้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ต่ำกว่ามวลรวมจากธรรมชาติค่อนข้างมาก การทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลที่ส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตเกิดจากสาเหตุทางกายภาพและทางเคมี โดยการทำลายทางเคมีเกิดจากสารประกอบซัลเฟตที่อยู่ในน้ำทะเล ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวแตกร้าว และสูญเสียการรับแรง (Neville, 1996) ส่วนการทำลายทางกายภาพเกิดจากการกัดเซาะ (Erosion) ได้แก่ คลื่นจากน้ำทะเล กรวดทรายที่ทำให้คอนกรีตเกิดการสึกกร่อน และสูญเสียการรับแรงได้ ในการศึกษาครั้งนี้ ตัวอย่างคอนกรีตแช่บริเวณชายฝั่งทะเล ซึ่งส่งผลให้การทำลายทางกายภาพน่าจะสูงกว่าการทำลายทางเคมี ดังนั้นคุณภาพของมวลรวมที่ช่วยด้านทานการทำลายเนื่องจากลักษณะทางกายภาพจึงมีความสำคัญมากกว่าการใช้เถาถ่านหินที่ช่วยป้องกันการทำลายเนื่องจากสารประกอบซัลเฟต ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่มีคุณภาพดีกว่าสามารถทนทานต่อการกัดเซาะ และส่งผลให้มีการสูญเสียกำลังอัดน้อยกว่ากลุ่มที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตค่อนข้างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่า การแทนที่เถาถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้นในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตไม่ได้ส่งผลชัดเจนต่อการสูญเสียกำลังอัดหลังคอนกรีตแช่น้ำทะเล เช่น คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีร้อยละกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับ 28 วัน เท่ากับ 82.0, 85.2, 84.5, 88.0 และ 79.0 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้เถาถ่านหินลดการกัดเซาะเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตมีผลค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับคุณภาพของมวลรวม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ พบว่า กำลังอัดคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี มีแนวโน้มสูงกว่าที่อายุ 28 วันเล็กน้อย โดยให้ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับอายุ 28 วัน อยู่

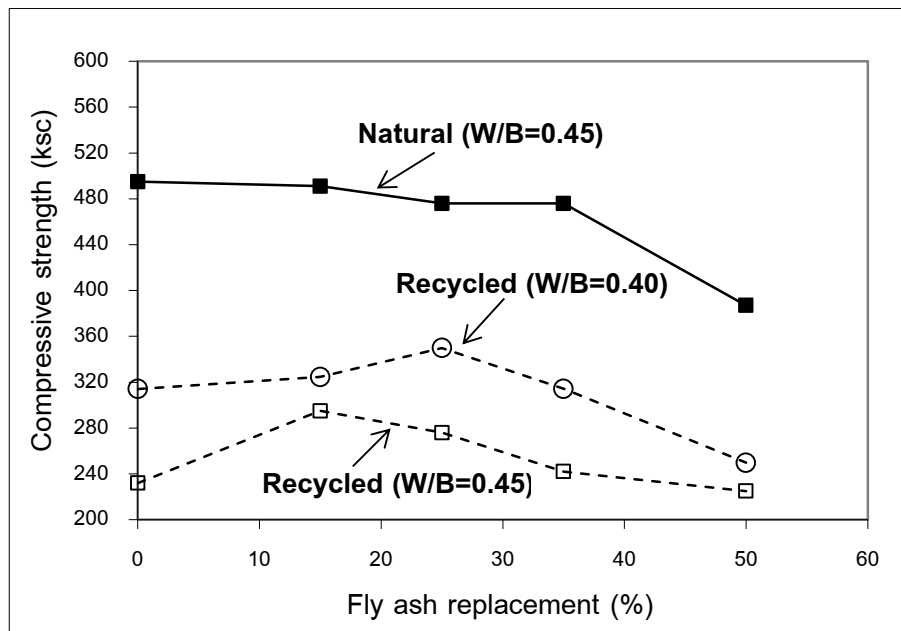
ในช่วง 98.2 ถึง 114.5 โดยกลุ่มที่ผสมเถ้านหินมีผลดีต่อการลดการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากน้ำทะเลมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้านหิน ทั้งนี้เป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นในระยะยาว และคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินช่วยลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบซัลเฟตและลดการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากเกลือซัลเฟตได้ (Neville, 1996; Bulatovic, et al., 2017)

ตารางที่ 4.7 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติที่อายุ 28 วัน และหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี

W/B ratio	เถ้านหิน (ร้อยละ)	กำลังอัดของคอนกรีต (กก/ซม ²)					
		มวลรวมจากเศษคอนกรีต			มวลรวมจากธรรมชาติ		
		28 วัน	แช่น้ำทะเล 5 ปี	กำลังอัด 5 ปีเทียบ 28 วัน (ร้อยละ)	28 วัน	แช่น้ำทะเล 5 ปี	กำลังอัด 5 ปีเทียบ 28 วัน (ร้อยละ)
0.45	0	304	232	76.3	504	495	98.2
	15	373	295	79.1	474	491	103.6
	25	317	276	87.1	432	476	110.2
	35	285	242	84.9	450	476	105.8
	50	270	225	83.3	338	387	114.5
0.40	0	383	314	82.0	-	-	-
	15	381	325	85.2	-	-	-
	25	414	350	84.5	-	-	-
	35	357	314	88.0	-	-	-
	50	316	250	79.0	-	-	-



ก) อายุบ่ม 28 วัน



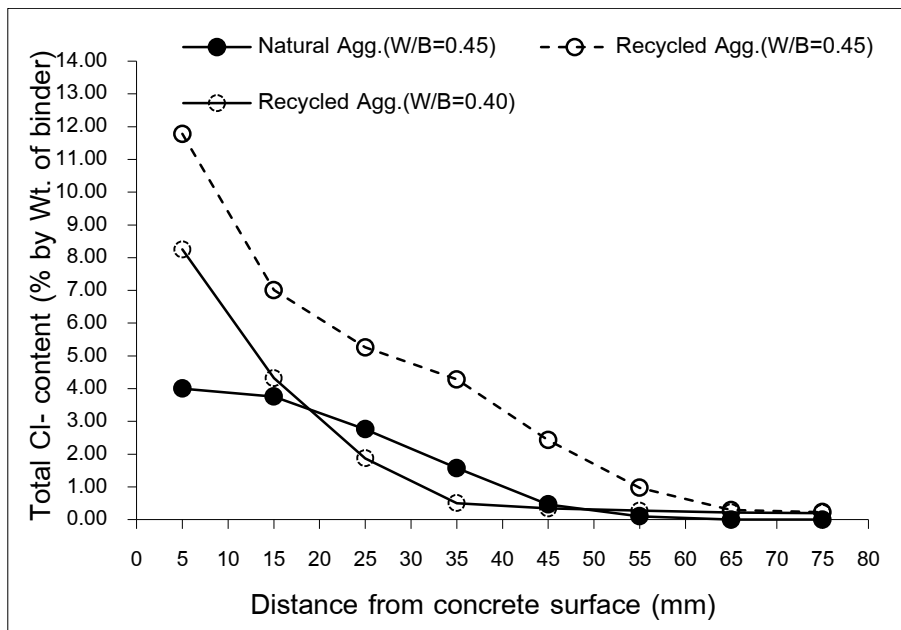
ข) อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี

รูปที่ 4.14 ผลของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ

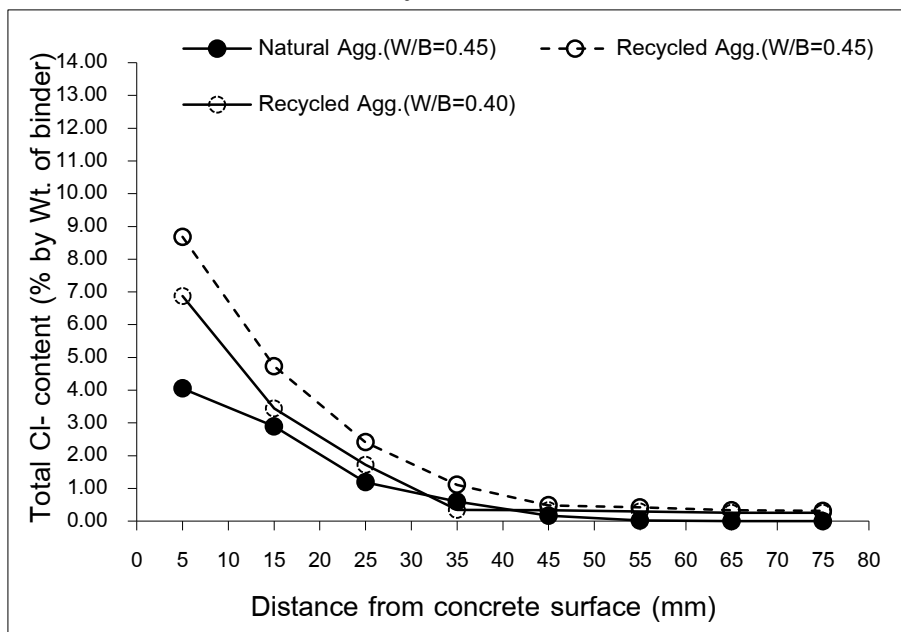
4.8.2 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจาก ธรรมชาติที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี

พิจารณาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ดังรูปที่ 4.15 พบว่า การใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลต่อการลดการแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมจากเศษคอนกรีตอย่างชัดเจน เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมจากเศษคอนกรีต เมื่อผสมเถ้านหินร้อยละ 0, 15 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้ามาที่ระดับความลึก 35 มม. เท่ากับร้อยละ 1.57, 0.59, 0.05 และ 4.28, 1.11, 0.28 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปฏิกริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้านหิน ได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เป็นเจลแข็งสามารถอุดช่องว่างและลดโพรงในคอนกรีตส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าในคอนกรีตได้อย่างชัดเจน (Chindaprasirt and Jaturapitakkul, 2008) ประกอบกับอนุภาคที่กลมตันของเถ้านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ สามารถแทรกช่องว่างและทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น

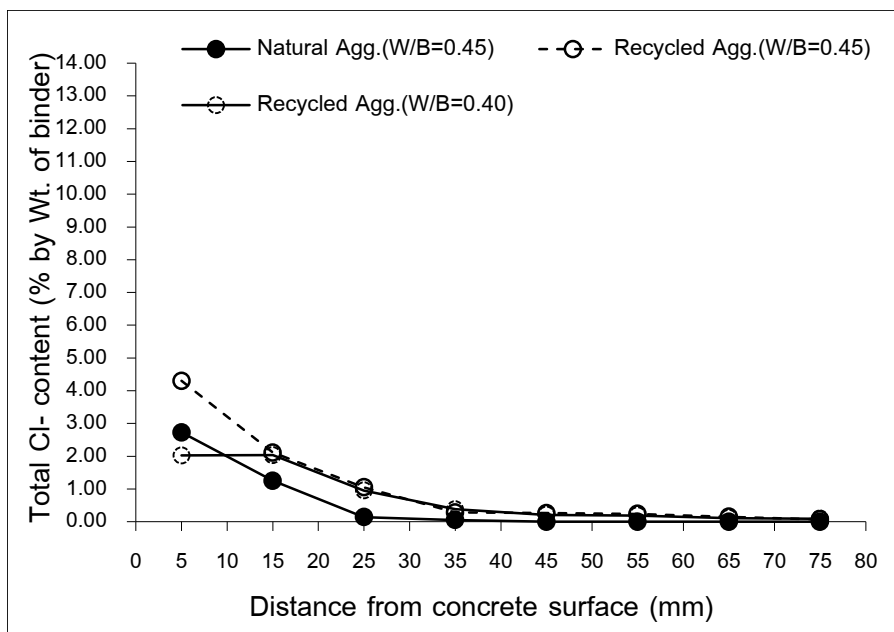
การศึกษานี้พบว่า ในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้านหินและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน กลุ่มที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้มากกว่ากลุ่มที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตอย่างชัดเจน (รูปที่ 4.15(ก)) และเมื่อผสมเถ้านหินในคอนกรีตร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสานดังรูปที่ 4.15(ข) พบว่า ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลของคอนกรีตทั้งสองกลุ่มใกล้เคียงกันมากขึ้น และการใช้เถ้านหินปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีตดังรูปที่ 4.15(ค) ยิ่งพบว่า กลุ่มที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นศักยภาพของเถ้านหิน ที่ซดเซยข้อดีของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลได้อย่างดี อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและผสมเถ้านหิน ยังส่งผลดีต่อความคงทนของคอนกรีต ที่ใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตค่อนข้างมาก ทั้งในด้านการลดการแทรกซึมของคลอไรด์เพื่อลดการเกิดสนิมเหล็กและกำลังอัดของคอนกรีตที่มีความคงทนต่อการทำลายทางกายภาพได้เป็นอย่างดี



ก) คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ข) คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุ
ประสาน



ค) คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเก้้าถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

รูปที่ 4.15 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

4.8.3 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี (D_c) ได้ใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) ดังแสดงในสมการที่ (1)

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

เมื่อค่า D_c ในสมการที่ (1) เป็นค่าคงที่ คำตอบทั่วไปของสมการที่ (1) แสดงดังสมการที่ (2)

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

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

x = ระยะจากหน้าผิวคอนกรีต (มม.)

t = ระยะเวลาที่แช่น้ำทะเล (วินาที)

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

D_c = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระยะเวลาแช่น้ำทะเล t

erf = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error function)

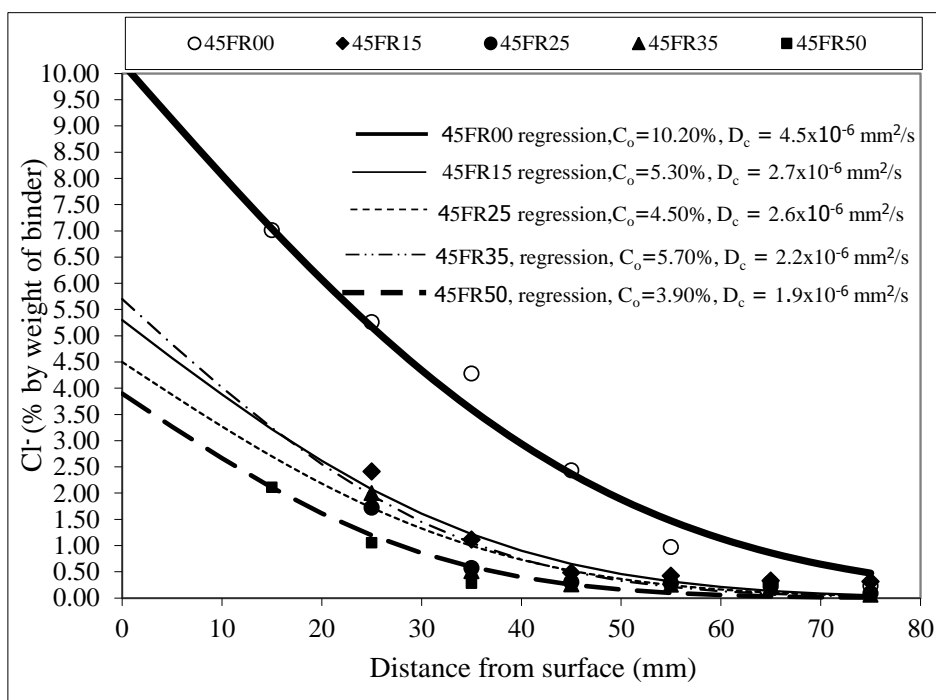
ทำการปรับค่า D_c และ C_0 ในสมการที่ (2) เพื่อให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี โดยรูปที่ 4.16 แสดงการหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตในส่วนผสมอื่นๆหาได้ในลักษณะเดียวกัน โดยสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ได้ใช้ข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Chalee et al., 2009) ดังแสดงในตารางที่ 4.8

เมื่อพิจารณาผลของเถ้านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ดังรูปที่ 4.17 พบว่า การใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลต่อการลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้อย่างชัดเจน ซึ่งให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งกลุ่มที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับการแทรกซึมของคลอไรด์ดังที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต พบว่า การใช้ปริมาณน้ำในคอนกรีตที่ลดลง ส่งผลให้ลดค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้านหินมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน โดยผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา (Chalee et al., 2009) ที่ศึกษาผลของเถ้านหิน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากความที่บ่น้ำในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้านหินขึ้นกับปริมาณน้ำและกำลังอัดเป็นหลัก ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน ความที่บ่น้ำขึ้นกับสมบัติทางเคมีของเถ้านหินที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และสมบัติทางกายภาพที่สามารถดูดแทรกช่องว่างในคอนกรีต ส่งผลให้ลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้ดี โดยผลดังกล่าวนี้จะชัดเจนในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินที่มีอนุภาคกลม ตัน นอกจากนั้นพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินอย่างน้อยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา ที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเถ้านหินสามารถปรับปรุงคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตให้ต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 อย่างไรก็ตาม ถึงแม้เถ้านหินสามารถเพิ่มสมบัติความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยการลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้อย่างน่าพอใจ แต่คอนกรีตที่ใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล จำเป็นต้องมีสมบัติด้านความคงทน

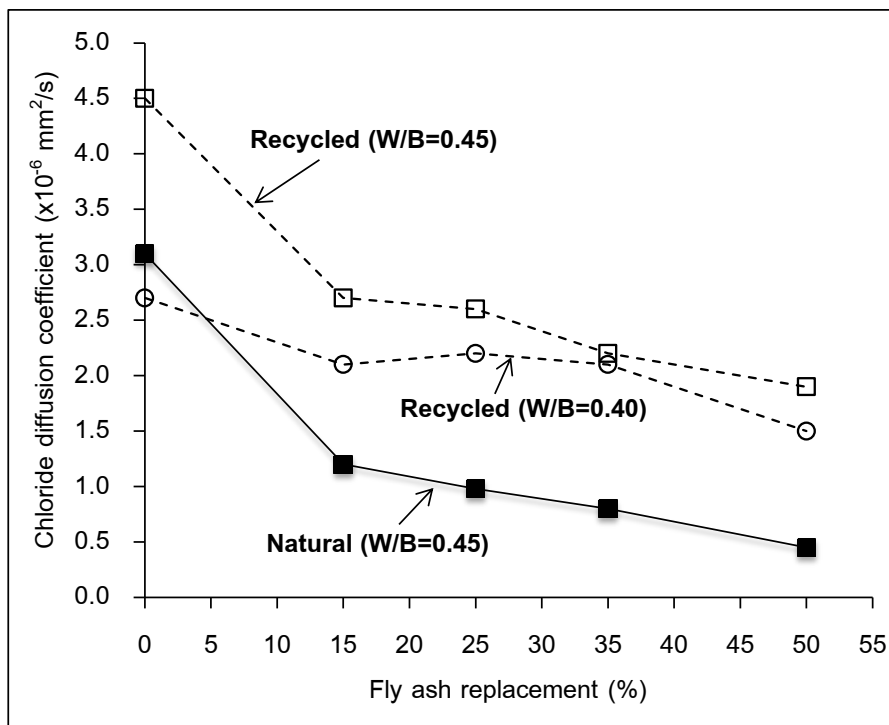
ควบคุมกำลังรับแรงอัดที่สูง โดยผลการศึกษพบว่า การใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลลดลงค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับมวลรวมจากธรรมชาติ ดังนั้นความเหมาะสมในการใช้เป็นคอนกรีตเพื่อใช้ก่อสร้างจริง ในสิ่งแวดล้อมทะเลคงผู้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติไม่ได้อย่างแน่นอน

ตารางที่ 4.8 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

Fly ash replacement (%)	Cl Diffusion coefficient ($D_c \times 10^{-6}$ mm/s)		
	Recycled (W/B=0.40)	Recycled (W/B=0.45)	Natural (W/B=0.45)
0	2.7	4.5	3.10
15	2.1	2.7	1.20
25	2.2	2.6	0.98
35	2.1	2.2	0.80
50	1.5	1.9	0.45



รูปที่ 4.16 การหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

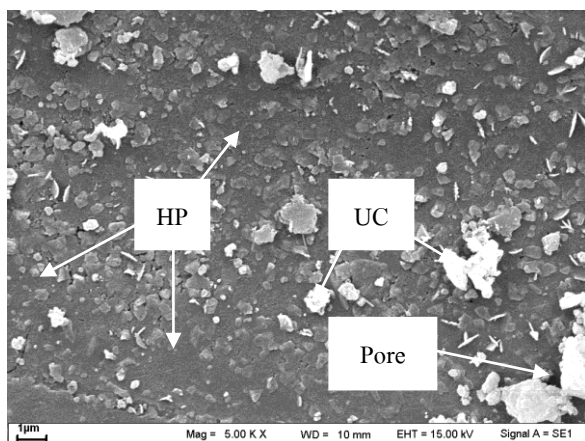


รูปที่ 4.17 ผลของเถ้านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

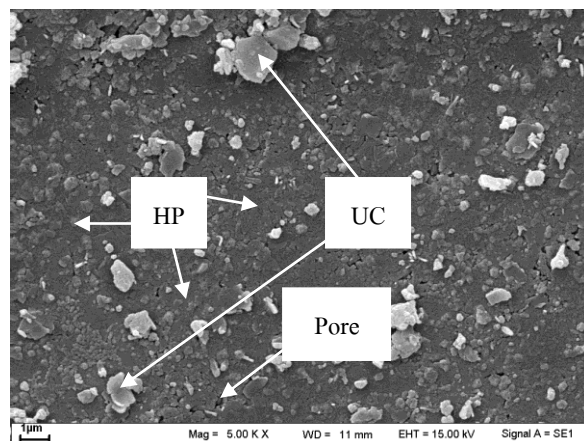
4.9 โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินที่แช่ในสถานะแวดล้อมทะเล

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.18 แสดงภาพขยาย Scanning Electron Microscopy (SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX) ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหายาจากเศษคอนกรีตและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 เมื่อผสมเถ้านหินร้อยละ 15 และ 25 โดยน้ำหนักต่อวัสดุประสาน ซึ่งสอดคล้องกับกำลังอัด, การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ตามที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งพบว่าเมื่อแทนที่เถ้านหินในปริมาณที่เหมาะสม โครงสร้างของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหายาจากเศษคอนกรีตจะมีความพรุนลดลง เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินร้อยละ 35 และ 50 อาจเกิดจากเถ้านหินทำปฏิกิริยากับผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน(HP) คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทำให้เกิดผลผลิตของปฏิกิริยาปอซโซลานคือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่ให้ความตึงน้ำและความแข็งแรงกับคอนกรีต (บริเวณสีคำที่ภาพที่ 4-18) ส่วนที่เหลือที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน (UC) ได้จะมีลักษณะเป็นก้อนสีขาว (บริเวณก้อนสีขาวภาพที่ 4-18) แต่เมื่อใช้เถ้านหินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ลดลง ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานลดลงตามด้วย (วิเชียร ชาติ, 2552) นอกจากนั้นตารางแสดงปริมาณธาตุ (EDX) ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหายาจากเศษคอนกรีตพบว่า ปริมาณซิลิกา (Si) ของคอนกรีตที่ใช้มวล

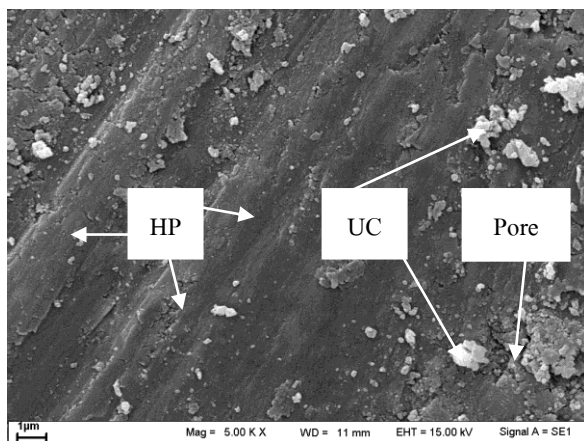
รวมหายจากเศษคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35, และ 50 มีค่าเท่ากับ 10.99, 18.13, 10.86, 14.65 และ 14.39 ตามลำดับ ปริมาณธาตุซิลิกา (Si) ของคอนกรีตที่ใช้รวมหายจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 จะมีปริมาณมากที่สุด เมื่อปริมาณธาตุซิลิกา (Si) ในคอนกรีตมากส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาและได้ผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) มากด้วย



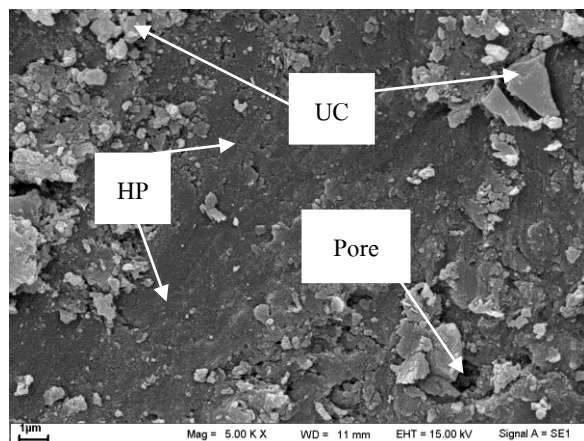
(ก) 40FR00



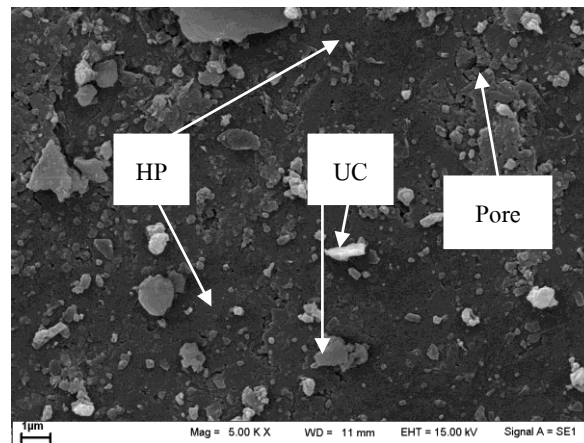
(ข) 40FR15



(ค) 40FR25



(ง) 40FR35



(จ) 40FR50

รูปที่ 4.18 ภาพขยาย Scanning Electron Microscopy (SEM) ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มี $W/B = 0.40$ หลังแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเข้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี สรุปผลได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเข้าถ่านหิน ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเข้าถ่านหินและเป็นแนวโน้มเดียวกัน ทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 และหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี พบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตทุกส่วนผสม มีการสูญเสียกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล

2. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ผสมเข้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้นและดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ไม่ได้ผสมเข้าถ่านหิน

3. การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ส่งผลต่อการลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเข้าถ่านหิน

4. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ผสมเข้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อยลง จะส่งผลให้เกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง

5. การแทนที่เข้าถ่านหินในคอนกรีตที่ปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กเสริมในคอนกรีตลดลงอย่างชัดเจนและมีแนวโน้มเหมือนกันทั้ง 3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

6. คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ก่อนข้างชัดเจน ถึงแม้ว่ามวลรวมจากเศษคอนกรีตจะใช้ปริมาณน้ำที่ต่ำกว่า และใช้สารลดน้ำเพื่อช่วยในการทำงานได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คุณภาพของมวลรวมหยาบมีผลค่อนข้างชัดเจนต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล

7. การใช้เข้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลต่อการลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตลงได้อย่างชัดเจน โดยพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเข้าถ่านหินอย่างน้อยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้สัมประสิทธิ์

การแทรกซึมของคลอไรด์ ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ
ประสานเท่ากับ 0.45

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรเก็บข้อมูลในระยะที่ยาวนานมากขึ้น เพื่อที่จะได้ข้อมูลที่ชัดเจน มีความสมบูรณ์ และสามารถ
นำไปใช้ประโยชน์ในงานจริงได้ดีและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- ASTM C150 : Standard Specification for Portland Cement, in 2017 *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.01, Philadelphia.
- ASTM C 457-90 : Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, in 1995 *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 228-240.
- ASTM C 128-93 : Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, in 1995 *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 69-73.
- 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 C188-95. (2003). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. *Annual Book of ASTM Standards*; V. 04.01.
- ASTM C127-12. (1997). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. *Annual Book of ASTM Standards*; V. 04.01.
- ASTM C128-12. (1997). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. *Annual Book of ASTM Standards*; V. 04.01.
- ASTM C1218 (2008). Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.02.
- ASTM C 33-93 : Standard Specification for Concrete Aggregates, in 1995 *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 10-16.
- ASTM C1152 (2008). Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.02.
- ACI 201.2R-01. Guide to durable concrete. ACI Committee 201, *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI 48333-9094, 2003.
- ACI 318-05. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. ACI Committee 318, *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI 48333-9094, 2004.
- ACI 363.2R-98. Guide to Quality Control and Testing of High-Strength Concrete. ACI Committee 363, *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI 48333-9094, 2004.

- Ashish Kumer Saha, (2018). Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustainable Environment Research*, vol. 28, pp. 25-31.
- Alaa M. Rashad, (2015). A brief on high-volume Class F fly ash as cement replacement – Aguide for Civil Engineer. *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 4, , pp. 278-306.
- Bulatovic, V., Melešev, M., Radeka, M., Radonjanin, V. and Lukić I., (2017). Evaluation of sulfate resistance of concrete with recycled and natural aggregates. *Construction and Building Materials*, vol. 152, no. 15, pp. 614-631.
- 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*, Vol. 33, No. 3, pp. 353-362.
- B.S.C.J., (1978). Study on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete, Building Contractors Society of Japan, Committee on Disposal and reuse of Construction Waste. *Summary in Concrete Journal*, Japan, Vol. 16, No. 7, pp. 18-31.
- Buck, A.D., (1973). Recycled Concrete. *Highway Research Record*, No. 430, pp. 1-8.
- Chalee, W., Ausapanit, P., and Jaturapitakkul, C. (2010). Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis. *Materials and Design*, 31, pp. 1242-1249.
- Chalee W. and Jaturapitakkul C. (2009). Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment. *Materials and Structures*, vol. 42, no. 4, pp. 505-515.
- Chalee, W., Teekavanit, M., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A., and Jaturapitakkul, C., (2007). Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment. *Construction and Building Materials*, Vol.21, No.5, pp. 965-971
- Cheewaket, T., Jaturapitakkuland, C. and Chalee, W. (2014). Concrete durability presented by acceptable chloride level and chloride diffusion coefficient in concrete—10-year results in marine site. *Materials and Structures*, 47, pp. 1501–1511.
- Chindaprasirt, P., and Jaturapitakkul, C., (2008) Cement, Pozzolan and Concrete,” 5th ed, *Thailand Concrete Association*, pp. 11-13, and pp. 238-240.

- Chung-Ho Huang, Shu-Ken Lin, Chao-Shun Chang and How-Ji Chen, (2013). Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash. *Construction and Building Materials*, vol. 46, no. 3, pp. 71-78, 2013.
- Etxeberria, M., Vazquez, E., Mari, E., and Barra, M. (2012). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and concrete research*, vol. 37, pp. 735-742.
- Frondistou-Yannas, S., (1977). Waste Concrete as Aggregate for New Concrete. *ACI Journal*, pp. 373-376.
- Gerardu, J.J.A. and Hendriks, C.F., (1985). Recycling of Road Pavement Materials in the Netherlands. *Rijkswaterstaat Communications* NO. 38.
- Gjorv, O.E. and Vennesland, O., (1976). Sea Salt and Alkalinity of Concrete. *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 73, No. 9, pp. 512-516.
- Hansen, T.C., (1990). Long-Term Strength of High Fly Ash Concretes. *Cement and Concrete Research*, Vol. 20, No. 2, pp. 193-196.
- Hasaba, S., Kawamura, M. and Toriik, K., (1981). Drying Shrinkage and Durability of Concrete Made of Recycled Concrete Aggregates. *Japan Concrete Institute*, pp. 55-60.
- Hansen, TC, Narud, H., (1993). Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concr Inter-design and construction* 5(1):79-83
- Kakizaki, M., Harada, M. and Motoyasu, H., (1988). Manufacturing of Recovered Aggregate Through Disposal and Recovery of Demolished Concrete Structure. *Ibid.* 135, pp. 699-708.
- Kikuchi, M., Mukai, T. and Kozumi, H., (1988). Properties of Concrete Products Containing Recycled Aggregate. *Ibid.* 135, pp. 595-604.
- Kashino, N., Takahashi, Y., (1998). Experimental studies on. Placement of Recycled Aggregate concrete. *Demolition. Methods and Practice*. p. 557-564
- Kou, SC., Poon, KC., and Chan, D. (2007). Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. *ASCE's Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, no. 9, pp. 16-22.
- Lopez-Gayarre, F., Serna, P., Domingo-Cabo, A., Serrano-Lopez, MA., Lopez-Colina, C., (2009). Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste Manage* 29:3022-3028

- Limbachiya, MC., Leelawat, T., and Dhir, RK., (2000). Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structure*, 33, pp.574-580.
- Malhotra, VM., Sakata, K. and Ayano, T., (2000). Improvement of concrete with recycled aggregate. *CANMET/ACI. Durability of Concrete*. Proceedings Fifth International Conference. Barcelona, Spain 2000. Vol. II. pp. 1089 - 1108.
- Moffatt, EG., Thomas MDA., and Fahiml A. (2017). Performance of high-volume fly ash concrete in marine environment. *Cement and Concrete Research*, vol. 102, pp. 127-135.
- Neville, A.M., (1996). *Properties of Concrete*, 4th ed., Longman, Malaysia, pp. 563-575.
- Narud, H., (1981). Recycled Concrete in Low-Strength Concrete with Fly Ash. *Technical Report 110/82, Building Materials Laboratory*, Technical University of Denmark, Lyngby.
- Olorunsogo, FT., Padayachee, N. (2002). Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. *Cem Concr Res* 32(2):179-185.
- Poon, CS., Shui, ZH., Lam, L., (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Constr Build Mater* 18(6):461-468
- Sata, V., Jaturapitakkuland, C. and Kiattikomo, K. (2007). Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 21, pp. 1589–1598.
- Somna, R., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., and Rattanachu, P. (2012). Effect of W/B ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate. *ASCE's Journal of Materials in Civil Engineering*, 24, pp. 16-22.
- Somna, R., Jaturapitakkul, C., Rattanachu, P., and Chalee, W. (2012). Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. *Materials and Design*, vol. 36, pp. 597-603.
- Soshiroda, T., (1983). Recycled Concrete. *Proceedings 9th Congress of CIB*, Stockholm
- Tangchirapat, W., Buranasing, R., Jaturapitakkul, C., and Chindapasirt, P., (2008). Influence of rice husk-bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates". *Construction and Building Materials*, 22, pp.1812-1819.

- Topcu, IB., (1997). Physical and mechanical properties of concrete produced with waste concrete. *Cem Concr Res* 27(12):1817-1823
- Xiao J, Li J, Zhang Ch. (2005) Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cem Concr Res* ;35(6):1187-94.
- Yoshikane, T., (1995). Present Status of Recycling Waste Cement Concrete in Japan. *Private Communication Research Laboratory*, Taiyu Kensetsu Co.Ltd., Japan.
- คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, (2543). ความคงทนของคอนกรีต : คอนกรีตในสภาวะแข็งตัว, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า 72-76.
- ประจักษ์ เข็มบุบผา, (2548). การศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากคอนกรีตเก่าที่ถูกทำลายที่มีกำลังอัดแตกต่างกัน. *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*
- ปกป้อง รัตนชู, (2551). กำลังอัดและอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม ร่วมกับเถ้าถ่านหินและเถ้าชานอ้อย. *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*
- นำพล บุตรเชื้อไทย, เทียง ชิวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี, (2560). สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ* 27(3), หน้า 441-451
- รัฐพล สมณา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, (2554). การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 34 ฉบับที่ 4*

ภาคผนวก ก

ผลผลิต (Output)

บทความทางวิชาการระดับชาติ

- 1) เทียง ชีวะเกตุ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ชาลี. (2561). ผลของเจ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมธรรมชาติภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (Going on submission)

ผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวม จากเศษคอนกรีตและมวลรวมธรรมชาติภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

EFFECT OF FLY ASH ON CHLORIDE PENETRATION AND COMPRESSIVE STRENGTH OF RECYCLED AND NATURAL AGGREGATE CONCRETE UNDER 5-YEAR EXPOSURE IN MARINE ENVIRONMENT

เที่ยง ชีวะเกตุ¹ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล² และ วิเชียร ชาลี^{3*}

Tieng Cheewaket¹ Chai Jaturapitakkul² and Wichian Chalee^{3*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต และมวลรวมจากธรรมชาติภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี โดยใช้เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40 และ 0.45 สำหรับมวลรวมจากเศษคอนกรีต และ 0.45 สำหรับมวลรวมจากธรรมชาติ หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม³ สำหรับทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 28 วัน นำตัวอย่างทดสอบไปแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งในสภาวะเบี่ยงกลับแห้ง โดยเก็บตัวอย่างทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด และกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี ผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตทุกส่วนผสม มีการสูญเสียกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ส่วนกลุ่มที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสม มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลที่อายุ 5 ปี เพิ่มขึ้นจากอายุบ่ม 28 วัน การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลต่อการลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตลงได้อย่างชัดเจน ซึ่งให้ผลไปในทิศทางเดียวกันทั้งกลุ่มที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินอย่างน้อยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

คำสำคัญ : มวลรวมจากเศษคอนกรีต, มวลรวมจากธรรมชาติ, เถ้าถ่านหิน, สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์, สิ่งแวดล้อมทะเล

Abstract

This research studied the effect of fly ash on chloride diffusion coefficient and compressive strength of both recycled and natural aggregate concretes exposed to marine environment for 5 years. Mae-Moh fly ash were used to replace Portland cement at the percentages of 0, 15, 25, 35, and 50 by weight of binder with various water to binder (W/B) ratios of 0.40 and 0.45 in recycled aggregate mixtures and a W/B ratio of 0.45 in natural aggregate mixtures. Concrete cube specimens of 200x200x200 mm³ were cast and cured in fresh water for 28 days and then were placed in the tidal zone of marine environment for 5 years. Compressive strengths as well as the total chloride diffusion coefficients of the specimens were determined according to Fick's second law of diffusion. The research found that compressive strengths of recycled aggregate concretes decreased, whereas those of natural aggregate concretes increased after 5-year exposure in marine environment. Evidently, higher in fly ash contents would lower chloride diffusion coefficients of both recycled and natural aggregate concretes. Furthermore, use of fly ash as low as 15% replacement by weight in recycled aggregated concretes could provide lower chloride diffusion coefficient compared to Portland cement containing natural aggregate concrete with W/B of 0.45.

Keywords : Recycled aggregate, Fly ash, Chloride diffusion coefficient, Marine environment

¹อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (tieng@buu.ac.th)

²ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (chai.jat@kmutt.ac.th)

³รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (wichian@buu.ac.th)

* Corresponding Author, Tel. **08-9791-5171**, E-mail: wichian@buu.ac.th

1. บทนำ

ถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในเชิงพาณิชย์อย่างเป็นทางการมากขึ้น เนื่องจากมีฐานงานวิจัยที่น่าเชื่อถือได้ว่า ถ่านหินส่งผลให้สมบัติบางประการของคอนกรีตดีขึ้น โดยเฉพาะสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต จากการศึกษาที่ผ่านมา [1-3] พบว่า ถ่านหินมีบทบาทที่สำคัญในการปรับปรุงสมบัติของเพสต์ให้สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตได้อย่างชัดเจน โดยมีผลการศึกษาที่ยืนยันตรงกันทั้งในห้องปฏิบัติการและการศึกษาระยะยาวในภาคสนาม ทั้งนี้เนื่องจาก ถ่านหินมีซิลิกาและอลูมินาที่ไม่เป็นผลึก ประกอบกับถ่านหินที่มีอนุภาคกลมตัน และมีความละเอียดสูงสามารถที่จะทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี จึงมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดและความทึบแน่นของคอนกรีต ตลอดจนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน

ช่วยลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ส่งผลต่อความคงทนของคอนกรีตลงด้วย การศึกษาที่ผ่านมา [4] พบว่า การใช้ถ่านหินแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์และลดการเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามการใช้ถ่านหินในปริมาณสูงส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงและมีปัญหาต่อการรับแรงเชิงกลในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและส่งผลให้การทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลเกิดขึ้นได้มากขึ้น การศึกษาที่ผาสนมาพบว่า การใช้ถ่านหินที่มีคุณภาพดีแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในช่วงร้อยละ 25-35 โดยน้ำหนัก วัสดุประสานส่งผลดีทั้งสมบัติด้านความคงทนและสมบัติเชิงกลควบคู่กันไป

แนวคิดในการปรับปรุงมวลรวมจากเศษคอนกรีต (Recycled Aggregate) ซึ่งเป็นการนำมวลรวมจากสิ่งปลูกสร้างที่ถูกรื้อถอน มาใช้แทนมวลรวมจากธรรมชาติ โดยนำเศษคอนกรีตที่แข็งตัวมาย่อยให้มีขนาดลดลงได้มีการศึกษามากขึ้น อย่างไรก็ตามผลการศึกษาพบว่า

สมบัติของคอนกรีตที่ได้จากการใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตจะดีกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติค่อนข้างชัดเจน ทั้งทางด้านสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านความคงทน [5 - 7] การปรับปรุงสมบัติของเพสต์เพื่อชดเชยข้อด้อยของมวลรวมจากเศษคอนกรีตเป็นแนวทางการศึกษาที่น่าสนใจ โดยการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า [8] การใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถทำให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต พัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นในช่วงหลัง และทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้สมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตดีขึ้น นอกจากนี้ได้มีผลการศึกษาการปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี [9] ซึ่งพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีความเหมาะสมที่จะใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล เนื่องจากมีกำลังอัดและความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์เป็นไปตามที่ ACI 201.2R ได้แนะนำไว้ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลการศึกษาด้านความคงทนของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมจริงจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาเก็บข้อมูลที่นานขึ้น และควรมีการศึกษาเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการนำไปใช้งานอย่างน่าเชื่อถือมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาเปรียบเทียบผลของการปรับปรุงสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต และมวลรวมจากธรรมชาติ โดยใช้เถ้าถ่านหิน โดยศึกษาผลของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสาน

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะที่ได้จากโรงงานโดยตรง ในคอนกรีตกลุ่มที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติใช้เถ้าถ่านหินที่มีค่ากลางของอนุภาคเท่า 9.7 ไมโครเมตร ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.21 และมีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 79.45 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.05 ส่วนกลุ่มที่ใช้ในมวลรวมจากเศษคอนกรีตมีค่ากลางของอนุภาคเท่า 10.1 ไมโครเมตร ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 และมีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 72.51 และมีค่า

LOI ร้อยละ 0.07 โดยเถ้าถ่านหินที่ใช้ในคอนกรีตทั้งสองกลุ่มมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีใกล้เคียงกันและจากสมบัติทางเคมีจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [10]

2.2 มวลรวม

สมบัติมวลรวมที่ใช้ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ มวลรวมหยาบมีขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 19 มม. และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.66 ส่วนมวลรวมละเอียดมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.63 ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดของมวลรวมหยาบและละเอียดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.77 และ 2.57 ตามลำดับ

สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตได้ใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.74 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตที่ใช้ย่อยดังกล่าวมีกำลังอัดในช่วง 240-320 กก/ซม² (ทรงกระบอก) โดยมวลรวมดังกล่าวมีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.42 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.44 ร้อยละการของดูดซึมน้ำของมวลรวมจากเศษคอนกรีตเท่ากับ 4.92 ซึ่งสูงกว่ามวลรวมหยาบธรรมชาติที่เป็นหินปูนค่อนข้างมาก โดยมวลรวมหยาบธรรมชาติมีร้อยละการของดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.64 สมบัติทางกายภาพของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 1

2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

ในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่เตรียมเมื่อ 5 ปีที่แล้ว ได้ใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม³ สำหรับทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 28 วัน นำตัวอย่างทดสอบไปแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งในสภาวะเปียกสลบแห้ง โดยเก็บตัวอย่างทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดโดยใช้กรดเป็นตัวทำลายตามมาตรฐาน ASTM C1152 [11] และเจาะตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. สูง 100 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบแสดงดังรูปที่ 1

ส่วนคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติได้ใช้ฐานข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา [12] ที่ใช้ส่วนผสมคอนกรีตและการเตรียมตัวอย่างทดสอบเหมือนกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ โดยใช้ข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่สภาวะแวดล้อมทะเลและอายุแช่น้ำทะเลเดียวกับกลุ่มที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตเพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลการใช้ถ้ำถ่านหินในการปรับปรุงคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติแสดงดังตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพมวลรวม

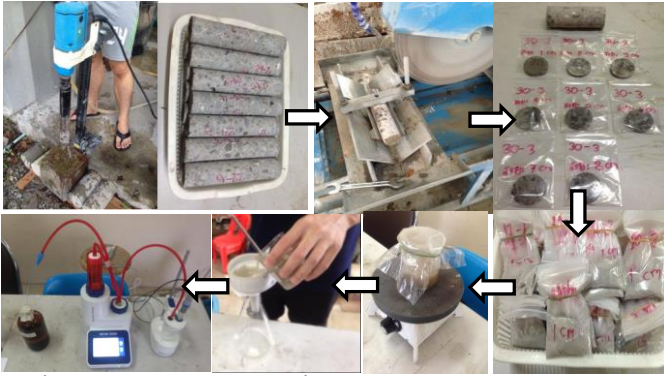
สมบัติทางกายภาพ	คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต		คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ	
	มวลรวมละเอียด	มวลรวมหยาบ	มวลรวมละเอียด	มวลรวมหยาบ
	โมดูลัสความละเอียด	2.74	6.42	2.63
ความถ่วงจำเพาะ	2.63	2.44	2.61	2.8
การดูดซึ่ม (ร้อยละ)	0.91	4.92	0.96	0.64
ความหนาแน่น (กก/ลบ.ม.)	1725	1476	1699	1616
ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม (มม)	-	19		19

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต

ส่วนผสม	สัดส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม. ³)					
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ถ้ำถ่านหิน	ทราย	มวลรวมจากเศษคอนกรีต	น้ำ	สารลดน้ำพิเศษ
40FR00	477	0	767	935	190	0.5
40FR15	405	72	767	910	190	0.5
40FR25	358	119	767	894	190	0.5
40FR35	310	167	767	875	190	0.5
40FR50	239	239	767	850	190	0.5
45FR00	424	0	767	979	190	0.4
45FR15	360	64	767	957	190	0.4
45FR25	318	106	767	938	190	0.4
45FR35	276	148	767	925	190	0.4
45FR50	212	212	767	903	190	0.4

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ

ส่วนผสม	สัดส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม. ³)				
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ถ้ำถ่านหิน	ทราย	มวลรวมจากธรรมชาติ	น้ำ
I45	478	-	639	1,024	215
I45FA15	406	72	639	1,004	215
I45FA25	359	119	639	990	215
I45FA35	311	167	639	977	215
I45FA50	239	239	639	957	215



รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

3. วิเคราะห์ผลการศึกษา

3.1 กำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.45 และมวลรวมจากธรรมชาติที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่อายุ 28 วันและหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี แสดงดังตารางที่ 4 โดยพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติทุกส่วนผสมมีกำลังอัดที่ อายุ 28 วัน และหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี สูงกว่า 350 กก/ซม² ซึ่งมีความเหมาะสมเชิงกลที่จะใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลตามข้อกำหนดของ ACI 201.2R [13] ส่วนคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 35 เท่านั้นที่มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงกว่า 350 กก/ซม² และกำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มนี้หลังแช่น้ำทะเล 5 ปี ลดลงค่อนข้างชัดเจน และต่ำกว่า 350 กก/ซม² ซึ่งอาจไม่มีความเหมาะสมในด้านสมบัติเชิงกลที่ใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล เมื่อพิจารณาผลของมวลรวมต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังรูปที่ 2(ก) พบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติมีกำลังอัดสูงกว่ามวลรวมจากเศษคอนกรีตทั้งสองอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานค่อนข้างชัดเจน ถึงแม้ว่ามวลรวมจากเศษคอนกรีตจะใช้ปริมาณน้ำที่ต่ำกว่าและใช้สารลดน้ำเพื่อช่วยในการทำงานได้ แต่กำลังอัดก็ยังต่ำกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า คุณภาพของมวลรวมหยาบมีผลค่อนข้างชัดเจนต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีต เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมจากเศษคอนกรีตที่อายุ 28 วัน พบว่า ให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน

กล่าวคือ การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติมากกว่ามวลรวมจากเศษคอนกรีต ซึ่งพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน ส่วนคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตพบว่าการใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีผลให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน และในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำถึง 0.40 ให้กำลังอัดสูงที่สุด เมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงถึงร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากกำลังอัดในช่วงต้นของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเป็นหลัก และการลดปูนซีเมนต์ลง โดยการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น ยิ่งมีผลทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ส่วนปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินกับปูนซีเมนต์เริ่มมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตในช่วงหลัง 7 วันเป็นต้นไปและพัฒนากำลังอัดต่อเนื่องในระยะยาว [12, 14] ส่วนในกรณีของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่พบว่า กำลังอัดสูงกว่ากลุ่มควบคุมเมื่อใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เป็นผลจากเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีลักษณะอนุภาคที่กลมตัน สามารถแทรกช่องว่างในคอนกรีตได้ดี ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและส่งผลให้กำลังอัดสูงกว่ากลุ่มควบคุมได้ [6] นอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างซิลิกาและอลูมินาในเถ้าถ่านหิน กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันยังส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นได้

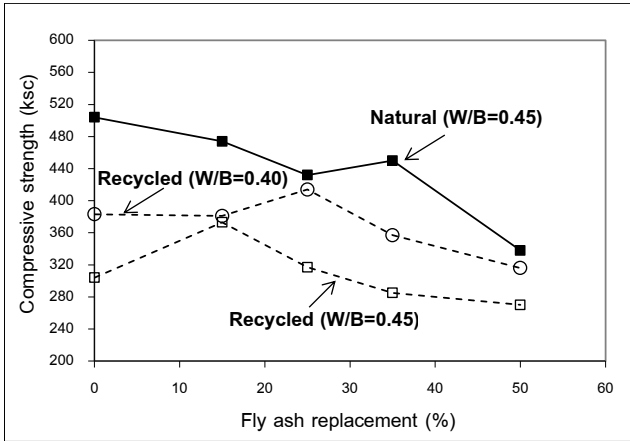
เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมจากเศษคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลบริเวณชายฝั่งเป็นเวลา 5 ปี ดังตารางที่ 4 พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ยังคงให้กำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตทั้งสองอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยรูปที่ 2(ข) พบว่าแนวโน้มของกำลังอัดคอนกรีตทั้งสองกลุ่ม ที่ปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินต่างกัน เป็นไปในทิศทางกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน โดยพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ มีกำลัง

อัดหลังแช่น้ำทะเลสูงกว่ากลุ่มที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตชัดเจนมากขึ้น เมื่อเทียบกับกำลังอัดที่อายุปม 28 วัน ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับการสูญเสียกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลที่อยู่ในรูปร้อยละกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับอายุปมคอนกรีต 28 วัน ซึ่งพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ทุกส่วนผสมมีร้อยละกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับ 28 วัน สูงกว่า 100 ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตทุกส่วนผสมมีกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับอายุปมคอนกรีต 28 วันต่ำกว่าร้อยละ 90 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ด้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ต่ำกว่ามวลรวมจากธรรมชาติค่อนข้างมาก การทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลที่ส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตเกิดจากสาเหตุทางกายภาพและทางเคมี โดยการทำลายทางเคมีเกิดจากสารประกอบซัลเฟตที่อยู่ในน้ำทะเล ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวแตกร้าว และสูญเสียการรับแรง [15] ส่วนการทำลายทางกายภาพเกิดจากการกัดเซาะ (Erosion) ได้แก่คลื่นจากน้ำทะเล กรวดทรายที่ทำให้คอนกรีตเกิดการสึกกร่อนและสูญเสียการรับแรงได้ ในการศึกษาครั้งนี้ ตัวอย่างคอนกรีตแช่บริเวณชายฝั่งทะเล ซึ่งส่งผลให้การทำลายทางกายภาพน่าจะสูงกว่าการทำลายทางเคมี ดังนั้นคุณภาพของมวลรวมที่ช่วยต้านทานการทำลายเนื่องจากลักษณะทางกายภาพจึงมีความสำคัญมากกว่าการใช้เถ้าถ่านหินที่ช่วยป้องกันการทำลายเนื่องจากสารประกอบซัลเฟต ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่มีคุณภาพดีกว่าสามารถทนทานต่อการกัดเซาะ และส่งผลให้มีการสูญเสียกำลังอัดน้อยกว่ากลุ่มที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตค่อนข้างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่า การแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้นในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตไม่ได้ส่งผลชัดเจนต่อการสูญเสียกำลังอัดหลังคอนกรีตแช่น้ำทะเล เช่น คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีร้อยละกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับ 28 วัน เท่ากับ 82.0, 85.2, 84.5, 88.0 และ 79.0 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้เถ้าถ่านหินเพื่อลดการทำลายเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตมีผลค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับคุณภาพของมวลรวม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ พบว่า กำลังอัดคอนกรีตหลัง

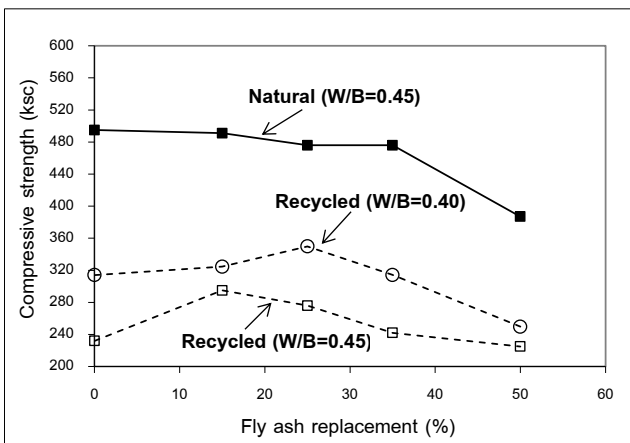
แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี มีแนวโน้มสูงกว่าที่อายุ 28 วันเล็กน้อย โดยให้ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับอายุ 28 วัน อยู่ในช่วง 98.2 ถึง 114.5 โดยกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินมีผลดีต่อการลดการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากน้ำทะเลมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน ทั้งนี้เป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นในระยะยาว และคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินช่วยลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบซัลเฟตและลดการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากเกลือซัลเฟตได้ [15, 16]

ตารางที่ 4 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติที่อายุ 28 วันและหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี

W/B ratio	เถ้าถ่านหิน (ร้อยละ)	กำลังอัดของคอนกรีต (กก/ซม ²)					
		มวลรวมจากเศษคอนกรีต			มวลรวมจากธรรมชาติ		
		28 วัน	แช่น้ำทะเล 5 ปี	กำลังอัด 5 ปี เทียบ 28 วัน (ร้อยละ)	28 วัน	แช่น้ำทะเล 5 ปี	กำลังอัด 5 ปี เทียบ 28 วัน (ร้อยละ)
0.45	0	304	232	76.3	504	495	98.2
	15	373	295	79.1	474	491	103.6
	25	317	276	87.1	432	476	110.2
	35	285	242	84.9	450	476	105.8
	50	270	225	83.3	338	387	114.5
0.40	0	383	314	82.0	-	-	-
	15	381	325	85.2	-	-	-
	25	414	350	84.5	-	-	-
	35	357	314	88.0	-	-	-
	50	316	250	79.0	-	-	-



ก) อายุปูน 28 วัน



ข) อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี

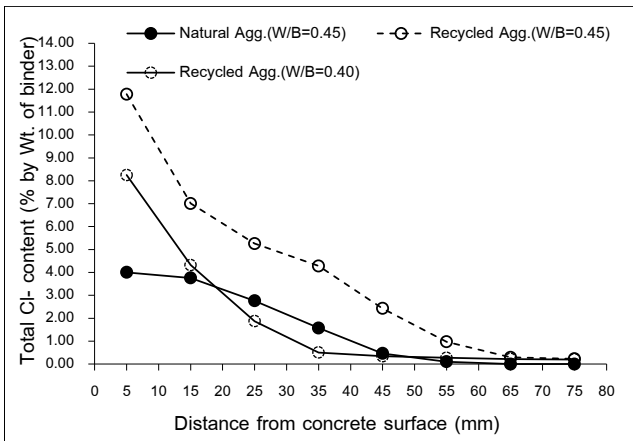
รูปที่ 2 ผลของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ

3.2 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี

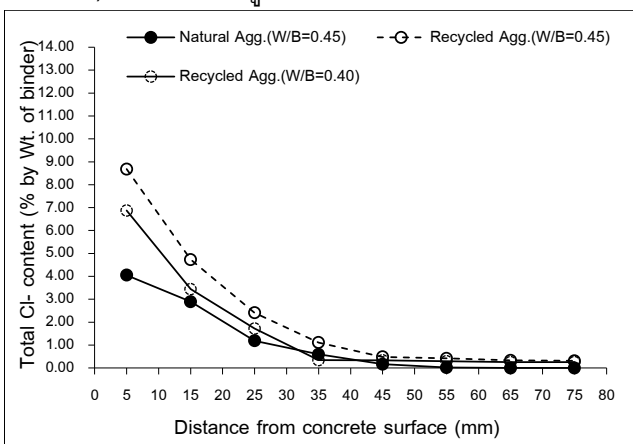
พิจารณาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ดังรูปที่ 3 พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลต่อการลดการแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมจากเศษคอนกรีตอย่างชัดเจน เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมจากเศษคอนกรีต เมื่อผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึม

เข้ามาที่ระดับความลึก 35 มม. เท่ากับร้อยละ 1.57, 0.59, 0.05 และ 4.28, 1.11, 0.28 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปฏิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหิน ได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เป็นเจลแข็งสามารถอุดช่องว่างและลดโพรงในคอนกรีตส่งผลให้ลดการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตได้อย่างชัดเจน [15,16] ประกอบกับอนุภาคที่กลมตันของเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้สามารถแทรกช่องว่างและทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น

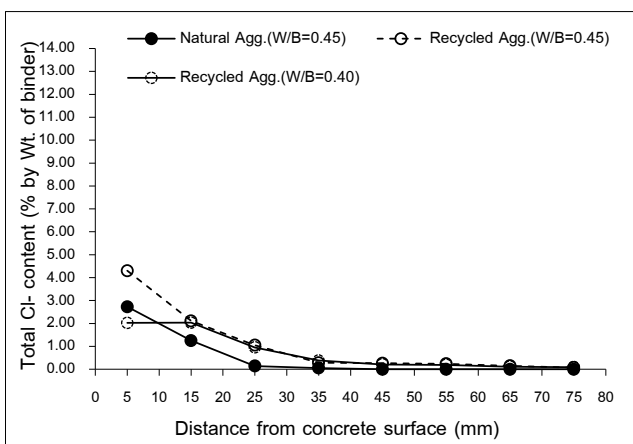
การศึกษาครั้งนี้พบว่า ในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน กลุ่มที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้มากกว่ากลุ่มที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตอย่างชัดเจน (รูปที่ 3(ก)) และเมื่อผสมเถ้าถ่านหินในคอนกรีตร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสานดังรูปที่ 3(ข) พบว่า ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลของคอนกรีตทั้งสองกลุ่มใกล้เคียงกันมากขึ้น และการใช้เถ้าถ่านหินปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีตดังรูปที่ 3(ค) ยิ่งพบว่า กลุ่มที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นศักยภาพของเถ้าถ่านหิน ที่ช่วยลดข้อด้อยของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลได้อย่างดี อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและผสมเถ้าถ่านหิน ยังส่งผลดีต่อความคงทนของคอนกรีต ที่ใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตค่อนข้างมาก ทั้งในด้านการลดการแทรกซึมของคลอไรด์เพื่อลดการเกิดสนิมเหล็ก และกำลังอัดของคอนกรีตที่มีความคงทนต่อการทำลายทางกายภาพได้เป็นอย่างดี



ก) คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ข) คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าน้ำหนักร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



ค) คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าน้ำหนักร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

รูปที่ 3 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

3.3 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี (D_c) ได้ใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) ดังแสดงในสมการที่ (1)

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

เมื่อค่า D_c ในสมการที่ (1) เป็นค่าคงที่ คำตอบทั่วไปของสมการที่ (1) แสดงดังสมการที่ (2)

$$C_{x,t} = C_0 [1 - \text{erf}(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}})] \quad (2)$$

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

x = ระยะจากหน้าผิวคอนกรีต (มม.)

t = ระยะเวลาที่แช่น้ำทะเล (วินาที)

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

D_c = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระยะเวลาแช่น้ำทะเล t

erf = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error function)

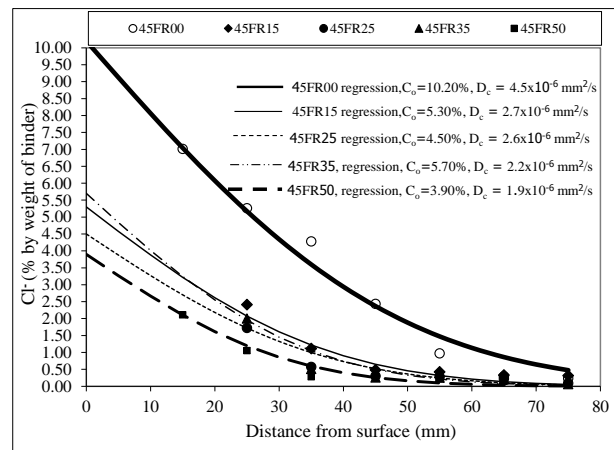
ทำการปรับค่า D_c และ C_0 ในสมการที่ (2) เพื่อให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี โดยรูปที่ 4 แสดงการหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตในส่วนผสมอื่นๆหาได้ในลักษณะเดียวกัน โดยสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ได้ใช้ข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา [12] ดังแสดงในตารางที่ 5

เมื่อพิจารณาผลของเถ้านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ดังรูปที่ 5 พบว่า การใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลต่อการลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้อย่างชัดเจน ซึ่งให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งกลุ่มที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับการแทรกซึมของคลอไรด์ดังที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต พบว่า การใช้ปริมาณน้ำในคอนกรีตที่ลดลง ส่งผลให้ลดค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้านหินมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน โดยผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา [12] ที่ศึกษาผลของเถ้านหิน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากความที่บ้น้ำในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้านหินขึ้นกับปริมาณน้ำและกำลังอัดเป็นหลัก ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน ความที่บ้น้ำขึ้นกับสมบัติทางเคมีของเถ้านหินที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และสมบัติทางกายภาพที่สามารถอุดแทรกช่องว่างในคอนกรีต ส่งผลให้ลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้ดี โดยผลดังกล่าวนี้จะชัดเจนในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินที่มีอนุภาคกลม ตัน นอกจากนี้พบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินอย่างน้อยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา ที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เถ้านหินสามารถปรับปรุงคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตให้ต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 อย่างไรก็ตาม ถึงแม้เถ้านหินสามารถเพิ่มสมบัติความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยการลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้อย่างน่าพอใจ แต่คอนกรีตที่ใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล จำเป็นต้องมีสมบัติด้านความคงทนควบคู่กับกำลังรับแรงอัดที่สูง โดยผลการศึกษาพบว่า การใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลลดลง

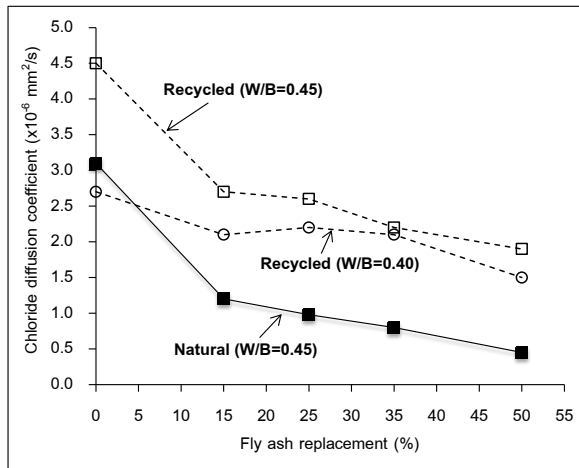
ค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับมวลรวมจากธรรมชาติ ดังนั้นความเหมาะสมในการใช้เป็นคอนกรีตเพื่อใช้ก่อสร้างจริง ในสิ่งแวดล้อมทะเลคงสู้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติไม่ได้อย่างแน่นอน

ตารางที่ 5 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

Fly ash replacement (%)	CI Diffusion coefficient ($D_c \times 10^{-6}$ mm/s)		
	Recycled (W/B=0.40)	Recycled (W/B=0.45)	Natural (W/B=0.45)
0	2.7	4.5	3.10
15	2.1	2.7	1.20
25	2.2	2.6	0.98
35	2.1	2.2	0.80
50	1.5	1.9	0.45



รูปที่ 4 การหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี



รูปที่ 5 ผลของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

4. สรุป

จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ดังนี้

- 4.1 คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ค่อนข้างชัดเจน ถึงแม้ว่ามวลรวมจากเศษคอนกรีตจะใช้ปริมาณน้ำที่ต่ำกว่า และใช้สารลดน้ำเพื่อช่วยในการทำงานได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คุณภาพของมวลรวมหยาบมีผลค่อนข้างชัดเจนต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล
- 4.2 คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตทุกส่วนผสม มีการสูญเสียกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ขณะที่กลุ่มที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสม มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลที่อายุ 5 ปี เพิ่มขึ้นจากอายุบ่ม 28 วัน
- 4.3 การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลต่อการลดการแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมจากเศษคอนกรีตอย่างชัดเจน โดยการใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลให้การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตเข้าใกล้มวลรวมจากธรรมชาติมากขึ้น

4.4 การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลต่อการลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตลงได้อย่างชัดเจน โดยพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินอย่างน้อยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสานให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ท่านอดิพนธ์การวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ วจพ. 24 /2556 และท่านสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 106/2560

เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Chalee, P. Ausapanit, and C. Jaturapitakkul, "Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis," *Materials and Design*, vol. 31, no. 3, pp. 1242-1249, March 2010.
- [2] Ashish Kumer Saha, "Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete," *Sustainable Environment Research*, vol. 28, pp. 25-31, 2018.
- [3] Chung-Ho Huang, Shu-Ken Lin, Chao-Shun Chang and How-Ji Chen, "Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash," *Construction and Building Materials*, vol. 46, no. 3, pp. 71-78, 2013.
- [4] EG. Moffatt, MDA. Thomas, and A. Fahiml, "Performance of high-volume fly ash concrete in marine environment," *Cement and Concrete Research*, vol. 102, pp. 127-135, 2017.
- [5] R. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Rattanachu, and W. Chalee, "Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled

- aggregate concrete," *Materials and Design*, vol. 36, pp. 597-603, April 2012.
- [6] M. Etxeberria, E. Vazquez, E. Mari, and M. Barra, "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete," *Cement and concrete research*, vol. 37, pp. 735-742, 2012.
- [7] SC. Kou, KC. Poon, and D. Chan, "Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete," *ASCE's Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, no. 9, pp. 16–22, 2007.
- [8] R. Somna, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, and P. Rattanachu, "Effect of W/B ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate," *ASCE's Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 24, no. 1, pp. 16–22, January 2012.
- [9] N. Butchueathai, T. Cheewaket, and W. Chalee, "Chloride diffusion coefficient of recycled aggregate concretes containing fly ash under 3-year exposure in marine environment" *Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 27, no. 3, pp. 441-451, 2017 (in Thai).
- [10] *ASTM Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*, Annual Book of ASTM Standards C618-03, 2003, 04.02.
- [11] *ASTM Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete*, Annual Book of ASTM Standards C 1152, 2008, 04.02.
- [12] W. Chalee and C. Jaturapitakkul, "Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment," *Materials and Structures*, vol. 42, no. 4, pp. 505-515, May 2009.
- [13] *ACI Guide to durable concrete*, American Concrete Institute ACI Committee 201.2R-01, 2003.
- [14] Alaa M. Rashad, "A brief on high-volume Class F fly ash as cement replacement – A guide for Civil Engineer," *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 4, , pp. 278-306, 2015.
- [15] P. Chindapasirt, and C. Jaturapitakkul, "Cement, Pozzolan and Concrete," 5th ed, *Thailand Concrete Association*, pp. 11-13, and pp. 238-240, 2008. (In Thai).
- [16] V. Bulatovic, M. Melešev, M. Radeka, V. Radonjanin and I. Lukić, "Evaluation of sulfate resistance of concrete with recycled and natural aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 152, no. 15, pp. 614-631, 2017.

ภาคผนวก ข
รายงานการเงิน

รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย (NRPM 13 หลัก) 2560A10802117 สัญญาเลขที่ 106/2560

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.
2560 มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ...ความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตผสมแก้่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

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

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ (วัน/ เดือน/ ปี)...1 ตุลาคม 2559 ถึงวันที่ (วัน/ เดือน/ ปี) ...30 กันยายน 2560

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

รายรับ

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50%) จำนวน ...237,500บาท เมื่อ ...พฤศจิกายน พ.ศ. 2559...

งวดที่ 2 (40%) จำนวน ...190,000.....บาท เมื่อ ...พฤษภาคม พ.ศ. 2560.....

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

รวม ...427,500.....บาท

รายจ่าย

หมวด	งบประมาณที่ตั้งไว้ (บาท)	งบประมาณที่ใช้ จริง (บาท)	จำนวนเงิน คงเหลือ/เกิน (บาท)
1. ค่าตอบแทน	40,000	40,000	0
2. ค่าจ้าง	120,000	120,000	0
3. ค่าวัสดุ	50,000	50,000	0
4. ค่าใช้สอย	203,000	203,000	0
5. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ค่าบริการด้านสื่อสารและโทรคมนาคม ค่าเงินทุนอุดหนุนการวิจัยของ มหาวิทยาลัยเป็นค่าสาธารณูปโภค 10%	62,000	62,000	0
รวม	475,000	475,000	0

(รศ.ดร.วิเชียร ชาลี)

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

ภาคผนวก ค
ประวัตินักวิจัย

ประวัติผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ – นามสกุล (ภาษาไทย) นายวิเชียร ชาลี

ชื่อ – นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Wichian Chalee

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

โทรศัพท์ 038-102-222 ต่อ 3356

โทรสาร 038-102-222 ต่อ 3355

E-mail wichian@buu.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2541

ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2546

ปริญญาเอก วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี พ.ศ. 2550

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

วัสดุก่อสร้าง, คอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานและเถ้าชีวมวล, ความคงทนของคอนกรีต

ผลงานวิชาการ

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิจัยระดับนานาชาติ

- T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee, “Concrete durability presented by acceptable chloride level and chloride diffusion coefficient in concrete—10-year results in marine site”, *Materials and Structures* (2014) 47:1501–1511
- P. Chindaprasirt and W. Chalee, “Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site”, *Construction and Building Materials* 63, 2014, pp. 303–310
- W. Chalee¹, T. Sasakul, P. Suwanmaneechot, and C. Jaturapitakkul, “Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment”, *Cement and concrete composites* 37, 2013, pp. 47–53
- T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee, “Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site”, *Construction and Building Materials* 37, 2012, pp. 693–698
- Rattapon Somna, Chai Jaturapitakkul, Pokpong Rattanachu, Wichian Chalee, “Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete”, *Materials and Design* 36, 2012, pp. 597–603
- Rattapon Somna, Chai Jaturapitakkul, Wichian Chalee, Pokpong Rattanachu, “Effect of W/B ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate”, *ASCE's Journal of Materials in Civil Engineering*, 24, 2012, pp. 16-22
- T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee, 2010, “Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment”, *Construction and Building Materials* 24 (2010) 1352–1357
- W. Chalee, P. Ausapanit and C. Jaturapitakkul, 2010, “Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis”, *Materials and Design* (2010) 31 : pp. 1242-1249
- C. Sanawong and W. Chalee, 2010, “Water permeability in fly ash based geopolymer concrete”, *J. of Civil engineering and architecture* 4 (2010) 15-19

- W. Chalee and C. Jaturapitakkul*, 2009, "Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment", *Materials and Structures* (2009) 42 : pp. 505-514
- W. Chalee, C. Jaturapitakkul*, and P. Chindaprasirt' 2009 "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater" *Marine Structures*, 22, 2009, pp.341-353
- Prinya Chindaprasirt, Wichian Chalee, Chai Jaturapitakkul, and Ubolluk Rattanasak*, 2009, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers ," *Waste Management*, Vol.29, No. 2, pp 539-543. (Impact factor = 1.338)
- Chalee, W., Teekavanit, M., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A., and Jaturapitakkul, C.*, 2007, "Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment," *Construction and Building Materials*, Vol.21, No.5, pp. 965-971 (Impact factor = 2.293)

บทความประกอบการประชุมสัมมนาทางวิชาการระดับนานาชาติ

- W. Chalee, P. Suwanmaneechot and C. Jaturapitakkul (2011). CORROSION PERFORMANCE OF CONCRETE CONTAINING RICE HUSK-BARK ASH UNDER 5-YEAR EXPOSURE IN MARINE SITE. *Modern Methods and Advances in Structural Engineering and Construction ISEC-6*, Zurich, June 21-26, 21-28.
- Koonthong, S., Chawkitchareon, P., and Chalee, W. (2010). Compressive strength and thermal conductivity of concrete masonry block containing plastic label waste. *The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference, TISD 2010*, Thailand, pp.801-804
- Yimsiri, S. and Chalee, W. (2010). Damage of reinforced concrete building due to adjacent deep excvaton. 3rd *ASEAN Civil Engineering Conference, 3ACEC*, Manila, Philippine
- Suwanmaneechot, P., Jaturapitakkul, C., and Chalee, W. (2009). Chloride penetration of concrete containing rice husk-bark ash in marine exposure site. *4th International Conference in Construction Materials: Performance, Innovstions and Structural Implications*, Nagoya, Japan, pp. 725-730, 725-730.
- Chalee, W. and Jaturapitakkul, C. (2008). Long Term Performance of Fly Ash Concrete in Marine Environment. *The 8th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*, Bangkok, Thailand, 11th-14th November 2008, pp. 178-182
- T. Klabprasit, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, P. Chindaprasirt and S. Songpiriyakij (2008). Influence of Si/A1 ratio on Compressive Strength of Rice Husk-Bark Ashes and Fly Ash-based Geopolymer Paste.

The 3rd ACF international conference ACF/VCA, Rex Hotel, Ho Chi Minh City, Vietnam,
November 11-13, 2008, pp 151-157

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิจัยระดับชาติ

- มณเฑียร ฑีฆวานิช, ประสิทธิ์ อุตสาหกรรม, วิเชียร ชาลี, เอนก ศิริพานิชกร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิกเกียรติโกมล, 2549, “ผลกระทบของน้ำทะเลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน” วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 17, ฉบับที่ 2
- วิเชียร ชาลี, มณเฑียร ฑีฆวานิช, ประสิทธิ์ อุตสาหกรรม และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2550, “ผลกระทบเถ้าถ่านหินที่อยู่ในสถานะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี” วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 30, ฉบับที่ 1, หน้า 153-166.
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, วิเชียร ชาลี, และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2549, “การศึกษาการชะเถ้าถ่านหินลิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุซีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน;” วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 29, ฉบับที่ 4, หน้า 437-446.
- ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ, ธวัชชัย สาสกุล, วิเชียร ชาลี และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, “ผลกระทบของน้ำทะเลต่อคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินจากระบบฟลูอิดไดซ์เบด”, วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ปีที่ 31, ฉบับที่ 2, หน้า 357-370.
- วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552, “การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุซีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน”, Burapha Sci., J.14 (1) หน้า 47-55
- ชรินทร์ เสนาวงษ์, เกียรติสุดา สมณา และ วิเชียร ชาลี, 2553, “กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของซีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน”, Burapha Sci., J.15 (1) หน้า 13-22
- ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ วิเชียร ชาลี, 2554, “การแทรกซึมของคลอไรด์ในซีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”,วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 21 (2) : 187-195
- กิริติกร เจริญพร้อม และ วิเชียร ชาลี, 2554, “ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล”,วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 21 (3) : 257-266
- วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, “ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”,วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 34 (3) : 203-213

- วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, “ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล”, วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2554 หน้า 21-28
- วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, “การปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลโดยใช้เถ้าถ่านหิน”, Burapha Sci. J. 16 (2) : 51-62
- ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติและ วิเชียร ชาลี, 2555, “การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดและพูลเวอร์ไรซ์ ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล”,วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 22 (3), 2555: 1-13
- วิเชียร ชาลี และ กิรติกร เจริญพร้อม, 2555, “การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน”,วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 35(2), หน้า 157-170
- ณัฐกร แนบทอง, วิเชียร ชาลี, 2555, “การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบดในงานคอนกรีต”, Burapha Sci. J. 17(2) : 38-49
- วิเชียร ชาลี และ ชีรพงศ์ เชื้อพลบ, 2556, “การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลด้วยคลื่นอัลตราโซนิค”, วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี -36(2), หน้า 197-213
- วิเชียร ชาลี, 2556, “ระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 18(2), หน้า 132-143
- กิรติกร เจริญพร้อม, วิเชียร ชาลี, 2556 “ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 10 ปี”, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 23 (1),: 107-119
- กนกเนตร ชื่นนกลุ่ม วิศรา โกระวิโยธิน และ วิเชียร ชาลี, 2557 “ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออัตราการไหลของน้ำและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนจากเถ้าถ่านหิน” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 24(1)
- บุญยวีร์ นิลรัตน์ วัฒนา พุชโชทา และ วิเชียร ชาลี, 2558 “การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 20(1), หน้า 35-50

- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ชาลี, 2559 “การทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 26(1), หน้า 1-12
- Panha Huy Soklam Mov และ วิเชียร ชาลี, 2559 “การผลิตคอนกรีตบล็อก ชนิดรับน้ำหนักจากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 21(2), หน้า 31-46
- Reaksmey Soeurt และ วิเชียร ชาลี, 2559 “การปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบโดยใช้ด่างเร่งปฏิกิริยา” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 26(3)
- นำพล บุตรเชื้อไทย เทียง ชิวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี, 2560 “สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ตีพิมพ์ 2560 ปีที่ 27 ฉบับที่ 3 หน้า 441-451
- ณัฐพัชร ผาติไตรวัฒน์ และ วิเชียร ชาลี, 2560 “ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหิน” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ตีพิมพ์ 2560 ปีที่ 40 ฉบับที่ 3 หน้า 355-364
- Reaksmey Soeurt และ วิเชียร ชาลี, 2559 “ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 27(4) หน้า 737-748

บทความประกอบการประชุมสัมมนาทางวิชาการระดับชาติ

- เอนก ชมวงษ์, พัชรวิทย์ อ่วมดีเยี่ยม, วิมลรัตน์ บุตรดี, วิเชียร ชาลี “การประยุกต์ใช้ไม้ไผ่เคลือบผิวด้วยชันในคานคอนกรีตเสริมแรง”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 13, 7-9 มีนาคม 2561, ชลบุรี, หน้า STR 1- STR 7.
- เอนก ชมวงษ์, ไพบูล เงินรี, อนิรุทธ นิต์สน์, วิเชียร ชาลี “การประยุกต์ใช้อิฐมอดูตันเพื่อเป็นผนังรับน้ำหนัก”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 12, 15-17 กุมภาพันธ์ 2560, เพชรบุรี, หน้า MAT 123-129.
- เอนก ชมวงษ์, เจ เนื่องจางค์, ยศกร เพือกประดิษฐ์ และ วิเชียร ชาลี “การประยุกต์ใช้ไม้ไผ่แทนเหล็กในคานคอนกรีตเสริมแรง”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 12, 15-17 กุมภาพันธ์ 2560, เพชรบุรี, หน้า MAT 20-27.
- तिकัมพร หวานจันทร์ และ วิเชียร ชาลี “กำลังอัดและการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินหลังแช่สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 12, 15-17 กุมภาพันธ์ 2560, เพชรบุรี, หน้า MAT 115-122.

- เที่ยง ชีวะเกตุ น้ำผึ้ง มะรังศรี ศาตญา นาคะปักษิณ และ วิเชียร ชาลี “ผลของความละเอียดของเถ้าแกลบดำ และความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินผสมเถ้าแกลบดำ”, การประชุมวิชาการ โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 22, 18-20 กรกฎาคม 2560 นครราชสีมา หน้า 187-192.
- ไคสีเกะ อุจิยะ ภาณุพงศ์ พิสัยพันธ์ รัฐพล สมณา และ วิเชียร ชาลี “ผลของค่าแรงปฏิริยาต่อกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกจากเถ้าแกลบ”, การประชุมวิชาการ โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 22, 18-20 กรกฎาคม 2560 นครราชสีมา หน้า 181-186.
- Reaksmeiy Soeurt รัฐพล สมณา และ วิเชียร ชาลี “ผลของค่าแรงปฏิริยาต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหิน”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 11, 17-19 กุมภาพันธ์ 2559 นครราชสีมา หน้า 1-8.
- Ponhsampatea Ly นิชา สุระกิจ และ วิเชียร ชาลี “จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโพลีโพรพิลีนจากเถ้าถ่านหิน”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 11, 17-19 กุมภาพันธ์ 2559 นครราชสีมา หน้า 1-8.
- เอกรัตน์ สัชนานนท์ รัฐพล สมณา และ วิเชียร ชาลี “กำลังอัด การซึมของน้ำ และระยะคลอไรด์แทรกซึมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในส่วนผสม”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 11, 17-19 กุมภาพันธ์ 2559 นครราชสีมา หน้า 1-8.
- PONHSAMPATEA LY กิรติกร เจริญพร้อม เที่ยง ชีวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี “ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการ โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, 8-10 กรกฎาคม 2558 พัทยา ชลบุรี หน้า 1-6.
- REAKSMEY SOEURT PONHSAMPATEA LY และ วิเชียร ชาลี “กำลังอัดและการกักกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี”, การประชุมวิชาการ โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, 8-10 กรกฎาคม 2558 พัทยา ชลบุรี หน้า 1-6.
- ณัฐวุฒิ ธารเนตร ธรรมชาติ มูลสาร และ วิเชียร ชาลี “วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์”, การประชุมวิชาการ โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, 8-10 กรกฎาคม 2558 พัทยา ชลบุรี หน้า 1-6.
- ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ และ วิเชียร ชาลี “ระยะเวลาการกักกร่อนเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการ โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19, 14-16 พฤษภาคม 2557 อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น หน้า 831-836.

นำพล บุตรเชื้อไทย เทียง ชิวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี, 2556, “การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเข้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, 8-10 พฤษภาคม 2556 อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ หน้า MAT113-MAT118.

วิชัย พรหมรักษ์, อภิชาติ ทุมสุด และ วิเชียร ชาลี, 2556, “การป้องกันการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลโดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์”การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, 8-10 พฤษภาคม 2556 อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ หน้า MAT107-MAT112

กิริติกร เจริญพร้อม เทียง ชิวะเกตุ วิเชียร ชาลี, 2556, “ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, 8-10 พฤษภาคม 2556 อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ หน้า MAT234-MAT238

กิริติกร เจริญพร้อม เทียง ชิวะเกตุ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ชาลี, 2554, “การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล”การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 7, 19-21 ตุลาคม 2554 อำเภอเมือง จังหวัดระยอง หน้า MAT94-MAT100.

วิเชียร ชาลี, ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ธวัชชัย ศาสกุล 2553, “ผลของเถ้าถ่านหิน 3 แห้งต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล”,การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 6, 20-22 ตุลาคม 2553 อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี หน้า 40-48.

ชรินทร์ เสนาวงษ์ อธิธิพล วิไลลักษณ์และ วิเชียร ชาลี, 2552, “การทำคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากถ้ำกันเตาระบบฟลูอิดไดซ์เบด”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, 13-15 พฤษภาคม 2552, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หน้า 1587-1592

ชรินทร์ เสนาวงษ์ เกียรติสุดา สมณา ปริญญา จินดาประเสริฐ และ วิเชียร ชาลี, “คุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5, 20-22 ตุลาคม 2552

ศิชน คุณทอง เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ และ วิเชียร ชาลี, “ขนาดของเสียประเภทพลาสติกที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตมวลเบา”, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์ วิศวกรรม และการจัดการสิ่งแวดล้อมครั้งที่ 1, 22-23 กันยายน 2552, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 39-44

ศิชน คุณทอง เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ และ วิเชียร ชาลี, “ปริมาณของเสียประเภทพลาสติกที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตมวลเบา”, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยครั้งที่ 35, 15-17 ตุลาคม 2552, เดอะไฮทรีสอร์ท ชลบุรี

- P. Suwanmaneechot , C. Jaturapitakkul and W. Chalee , 2551, “Water permeability of fly ash concrete in marine environment”, การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอพอลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2, 5-6 กันยายน 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 49-55.
- รัฐพล สมณา วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, “ผลกระทบของเถ้านหิน 3 แหล่ง ต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต”, การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอพอลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2, 5-6 กันยายน 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 107-112.
- วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, “ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีเร่งกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต”, การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอพอลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2, 5-6 กันยายน 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 66-72.
- วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2550, “สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 3, 24-26 ตุลาคม 2550, โรงแรมลองบีช การ์เด้น โฮเทล แอนด์ สปา, พัทยา ชลบุรี หน้า 103-109
- รัชชัย ศาสกุล , ปิยพงษ์ สุวรรณณิโชติ, วิเชียร ชาลี, ชัย จาตุรพิทักษ์กุลและ เอกชัย ภัทรวงศ์ไพบูรณ์, 2550, “กำลังอัดและการซึมผ่านคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในสภาพแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, 2-4 พฤษภาคม 2550, โรงแรมอมรินทร์ลากูน จ. พิษณุโลก หน้า 41-46
- Wichian Chalee, Prasit Ausapanit and Chai Jaturapitakkul, “A model for predicting the required cover depth of fly ash concrete in marine environment, Annual Concrete Conference 2, Udon Thani, 2006.
- Chalee, W., Teekavanit, M., and Jaturapitakkul, C., “Compressive Strength and Chloride Penetration Profile of Fly Ash Concrete under 4-Year Exposure in Sea Water”, International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer, May 24-25, 2006, Khon Kaen, Thailand, pp. 180-188.
- Smith Songpiriyakij, Wichian Chalee, Chai Jaturapitakkul, “Model for Predicting Compressive Strength of Fly Ash Concrete from Fly Ash Fineness,” Proceeding of 8th National Convention on Civil Engineering, Khon Kean, 2003.
- ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, วิเชียร ชาลี, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2546, "ผลกระทบของความละเอียดเถ้านต่อกำลังอัดและโครงสร้างโพรงในพาสต์", การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 1, 14-16 พฤษภาคม, กาญจนบุรี, หน้า 225-232.

- วิเชียร ชาลี, มณเฑียร ทิฆมาณิช, ประสิทธิ์ อุตส่าห์พานิช, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2548, “ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและระยะหุ้มเหล็กต่อการกัดกร่อนในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในสภาวะแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน, 25-26 มกราคม 2549, ขอนแก่น, หน้า 527-532.
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, ชาญชัย พลตรี, และ วิเชียร ชาลี, 2548, “การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุอีพอกซีเมอร์จากเถ้าถ่านหิน”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม 2548, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ซิตี จอมเทียน พัทยา ชลบุรี

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

ข้าพเจ้า รศ.ดร. วิเชียร ชาลี ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย จากมหาวิทยาลัยบูรพา ประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

โครงการวิจัยเรื่อง ความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

Durability of recycle aggregate concrete containing fly ash under 5-year exposure in marine site

รหัสโครงการ 258326/ สัญญาเลขที่ 106/2560 ได้รับงบประมาณรวมทั้งสิ้น 475,000 บาท (สี่แสนเจ็ดหมื่นห้าพันบาทถ้วน)

ระยะเวลาการดำเนินงาน 1 ปี (ระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม 2559 ถึง 30 กันยายน 2560)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ การกัดกร่อนเหล็กเสริม และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี โดยใช้เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม³ และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ให้มีระยะหุ้มของคอนกรีตหนาเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. เพื่อทดสอบการกัดกร่อนเหล็กเสริมและการแทรกซึมของคลอไรด์ ตลอดจนหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 100x200 มม². เพื่อทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 28 วัน นำตัวอย่างทดสอบไปแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งในสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยเก็บตัวอย่างทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ การกัดกร่อนเหล็กเสริม และกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี ผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตทุกส่วนผสม มีการสูญเสียกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตและการกัดกร่อนเหล็กเสริมลงได้อย่างชัดเจน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงส่งผลต่อการลดการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน การศึกษาครั้งนี้พบว่า การแทนที่เถ้าถ่านหินแม่เมาะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ

ประสานเท่ากับ 0.40 มีความเหมาะสมทั้งกำลังอัดและความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่จะใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล

คำสำคัญ : มวลรวมจากเศษคอนกรีต, เถ้าถ่านหิน, การแทรกซึมคลอไรด์, กำลังอัด, การกัดกร่อนเหล็ก, สิ่งแวดล้อมทะเล

Abstract

The objectives of this investigation were to study the effect of W/B ratios and fly ash contents on chloride penetration, steel corrosion and compressive strength of recycled aggregate concrete under 5-year exposure in marine environment. Fly ash from MaeMoh power plant was used as a partial replacement of portland cement type I at 0, 15, 25, 35, and 50% by weight of binder. Water to binder ratios (W/B) was varied as 0.40, 0.45, and 0.50. Concrete cube specimens of $200 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$ were cast and steel bars of 12-mm in diameter and 50-mm in length are embedded at coverings of 10, 20, 50, and 75 mm. Besides, the cylindrical specimens of 100-mm in diameter and 200-mm in height were cast for compressive strength test. Subsequently, the hardened concrete specimens were cured in fresh water until the age of 28 days and then were exposed to tidal zone of marine environment. The specimens were tested for chloride penetration, steel corrosion and compressive strength in concrete after being exposed to the tidal zone for 5 years. The results showed that all recycle aggregated concrete show strength loss after 5-year exposure in marine site. The increase of fly ash replacement in concrete clearly reduced the chloride penetration and steel corrosion in recycled aggregate concrete. When the W/B ratio of concrete was reduced, the decrease of chloride penetration in concrete without fly ash was higher than that of the fly ash concrete. This study was found that the use of Mae-Moh fly ash to replace Portland cement between 15 and 25 percent by weight of binder with the W/B ratio of 0.40 in the mixture would be suggested to satisfy both compressive strength and chloride penetration resistance of recycled aggregate concretes exposed to marine environment.

Keywords: Recycled aggregate, Fly ash, Chloride penetration, Compressive strength, Steel corrosion, Marine environment

Output / Outcome

เทียง ชีวะเกตุ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ชาลี. (2561). ผลของเก้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมธรรมชาติภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (Going on submission)

ข้อเสนอแนะ

ควรเก็บข้อมูลในระยะที่ยาวนานมากขึ้น เพื่อที่จะได้ข้อมูลที่ชัดเจน มีความสมบูรณ์ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานจริงได้ดีและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น