



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการผลกระทบของน้ำทะเลตื้น
คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. และเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

โดย

ปิยพงษ์ สุวรรณมติโชติ

วิเชียร ชาลี

รศ.ดร. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มีนาคม 2550

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการผลกระทบของน้ำทะเลต่อ คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. และเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

โดย

ปิยพงษ์ สุวรรณฉวีโชติ

วิเชียร ชาติ

รศ.ดร. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย

สกว. และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

โครงการทุนวิจัยมหัศจรรย์ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ร่วมกับ

บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

ผลกระทบของน้ำทะเลตื้นเขินที่ผสมเกลือหิน เอ็น. พี. เอส. และเกลือหินแม่เมาะ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

(ระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม 2548 ถึง 31 มีนาคม 2550)

บทสรุปผู้บริหาร: ตามที่ทางสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ร่วมกับ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ได้มอบทุนอุดหนุนการวิจัยแก่นายชัย จาตุรพิทักษ์กุล ตามสัญญาเลขที่ RDG4950006 เพื่อวิจัยเรื่องผลกระทบของน้ำทะเลตื้นเขินที่ผสมเกลือหิน เอ็น. พี. เอส. และเกลือหินแม่เมาะ ขณะนี้การดำเนินการวิจัยได้เสร็จสิ้นแล้ว ผลการดำเนินงานวิจัยตลอดเวลา 18 เดือนที่ผ่านมา ได้มีบทความวิจัยที่เผยแพร่หรือได้รับการยอมรับให้ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติจำนวน 1 เรื่อง และอยู่ระหว่างการพิจารณาบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับประเทศอีก 1 เรื่อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. รายละเอียดของโครงการวิจัย

คณะผู้ดำเนินการวิจัย	:	รศ.ดร. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน) นายปิยพงษ์ สุวรรณณิโชติ (นักศึกษาผู้วิจัย) นายวิเชียร ชาติ (ผู้ช่วยวิจัย)
ระยะเวลาดำเนินการ	:	18 เดือน (ระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม 2548 ถึง 31 มีนาคม 2550)
งบประมาณ	:	310,650 บาท

2. สรุปผลการวิจัย

คอนกรีตที่ผสมเกลือหิน เอ็น. พี. เอส. ที่บดละเอียดจนมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 2.0

- คอนกรีตทุกส่วนผสมสามารถพัฒนากำลังอัดจากอายุ 28 วันได้ดี แม้ว่าจะแช่อยู่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน หลังจากนั้นกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยหรือเกือบคงที่ เมื่อแช่คอนกรีตในน้ำทะเลเป็นเวลา 365 วัน พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่แช่น้ำประปาเพียงเล็กน้อย ยกเว้นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 กำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลมีค่าเท่ากับคอนกรีตที่แช่น้ำประปา และคอนกรีตที่ผสมเกลือหิน เอ็น. พี. เอส. ในอัตราส่วนร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 365 วัน มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ส่วนคอนกรีตที่ผสมเกลือหินในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 15 ค่ากำลังอัดมีค่าลดลงและมีกำลังอัดต่ำสุดเมื่อแทนที่เกลือหินร้อยละ 50
- ผลการทดสอบปริมาณสารประกอบคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีต ที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 180 และ 365 วัน พบว่า คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเกลือหินในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถต้านทานสารประกอบคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม และ

เมื่อเพิ่มปริมาณเถาเถาในในส่วนผสม พบว่า ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตทุกระดับความลึกมีค่าลดลง

3. คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 180 วัน พบว่า เหล็กที่ฝังในคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ผสมเถาเถาในร้อยละ 15 เกิดสนิมเหล็กที่ระยะหุ้ม 1 ซม. เมื่อแช่คอนกรีตในน้ำทะเลครบ 365 วัน พบว่า แท่งเหล็กที่เกิดสนิมมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น โดยเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ทุกสัดส่วนผสมเกิดสนิมที่ระยะหุ้ม 1 ซม. ส่วนที่ระยะหุ้ม 2 ซม. มีเพียงคอนกรีตควบคุมเท่านั้นที่แท่งเหล็กเกิดสนิม สำหรับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และ 0.45 มีแนวโน้มเกิดสนิมน้อยกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 โดยภาพรวมของแท่งเหล็กที่เกิดสนิมพบว่าเป็นการกัดกร่อนเริ่มต้น โดยพื้นที่การเกิดสนิมมีค่าไม่เกินร้อยละ 17 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด และปริมาณการเกิดสนิมเหล็กมีแนวโน้มมากขึ้นตามปริมาณคลอไรด์ที่พบในคอนกรีต
4. กำลังอัดของคอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65, 0.55 และ 0.45 มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง และส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตลดลงเช่นกัน แต่เมื่อผสมเถาเถาในในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่า ปริมาณเถาเถาในมีอิทธิพลต่อการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์มากกว่าการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

คอนกรีตที่ผสมเถาเถาในแม่เมาะ

1. คอนกรีตที่ผสมเถาเถาในทุกสัดส่วนผสมมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นจากอายุ 28 วัน ถึง 5 ปี ที่แช่น้ำทะเล ในขณะที่คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีแนวโน้มของกำลังอัดลดลงเล็กน้อย
2. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I มีแนวโน้มต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในสภาพแวดล้อมทะเลได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V
3. คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ด้วยเถาเถาในทุกสัดส่วนผสม สามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V และการแทนที่เถาเถาในที่มากขึ้นพบว่าการซึมผ่านของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลจะลดลง
4. ที่อัตราส่วนการแทนที่เถาเถาในที่เท่ากัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถาเถาในที่มีความละเอียดมากกว่าสามารถให้กำลังอัดและต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์จากน้ำทะเลได้ดีกว่า และมีการเกิดสนิมเหล็กน้อยกว่าคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถาเถาในที่มีความละเอียดน้อยกว่า
5. เมื่อแช่น้ำทะเล 5 ปี คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ด้วยเถาเถาในเกือบทุกสัดส่วนผสมไม่ปรากฏการกัดกร่อนเหล็กเสริมคอนกรีตที่ระยะของคอนกรีตหุ้มเหล็กหนา 75 มม. หรือปรากฏน้อยมาก ในขณะที่คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีการกัดกร่อนเกิดขึ้นที่ระดับนี้ชัดเจน

3. บทความวิชาการที่เผยแพร่

1. Wichian Chalee, Monthien Teekavanit, and Chai Jaturapitakkul, 2006, "Chloride penetration profile and steel corrosion in fly ash concrete under 4-year exposure in marine environment of Thailand", The Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-10), August 3-5, Bangkok, Thailand, pp. 359-364.

บทความที่เสนอในวารสารวิชาการระดับประเทศและอยู่ในระหว่างการพิจารณา

2. ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ, ธวัชชัย ศาสกุล, วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ผลกระทบของน้ำทะเลต่อนครีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งและประเภทห้าผสมแก้วต้านหินจากระบบฟลูอิดไดซ์เบด, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.

4. เอกสารแนบที่เกี่ยวข้อง

1. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
2. รายงานการเงินฉบับล่าสุด
3. สำเนาบัญชีเงินฝาก
4. แผ่นบันทึกข้อมูลโครงการวิจัยและรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
5. สำเนาบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์แล้ว
6. บทความย่อของบทความที่อยู่ในระหว่างการพิจารณา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงผลกระทบของน้ำทะเลต่อกำลังอัด การซึมผ่านของคลอไรด์ การกักกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต และการซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอน. พี. เอส. และเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โดยทำการปรับปรุงคุณภาพเถ้าถ่านหิน เอน. พี. เอส. ด้วยการบดละเอียดจนมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 2.0 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 หล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ขนาด 200 มม. และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ให้มีระยะหุ้มเหล็กเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. บ่มคอนกรีตในน้ำประปา 28 วัน จากนั้นนำคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง หลังจากคอนกรีตแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 180 และ 365 วัน ได้เก็บตัวอย่างคอนกรีตมาทดสอบกำลังอัด การซึมผ่านของคลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ตลอดจนทดสอบการซึมผ่านคอนกรีตที่การแช่น้ำทะเล 365 วัน

ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ หล่อคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V โดยคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ไม่ผ่านการแยกขนาดและที่ผ่านการแยกขนาดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ซึ่งการเตรียมตัวอย่างเหมือนกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอน.พี.เอส. และเป็นการเก็บข้อมูลต่อเนื่องจากงานวิจัยที่ทำมาก่อนหน้านี้ หลังจากคอนกรีตแช่น้ำทะเลครบ 4 และ 5 ปี ได้เก็บตัวอย่างคอนกรีตมาทดสอบกำลังอัด การซึมผ่านของคลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ตลอดจนทดสอบการซึมผ่านคอนกรีตที่การแช่น้ำทะเล 5 ปี

ผลการวิจัย พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอน. พี. เอส. ทุกส่วนผสมสามารถพัฒนากำลังอัดได้ดี แม้ว่าจะแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน หลังจากนั้นกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อแช่น้ำทะเลถึงอายุ 365 วัน และคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอน. พี. เอส. สามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสมมากขึ้น ช่วยให้การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตดีขึ้น นอกจากนี้พบว่าสนิมเหล็กยังไม่เกิดขึ้นกับเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสม แต่ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินจะเกิดสนิม

เล็กน้อยที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10 และ 20 มม. โดยแนวโน้มการเกิดสนิมเหล็กมีมากขึ้นตามปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีต

ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีแนวโน้มการกัดกร่อนเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส. กล่าวคือ การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงและมีความละเอียดสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดี และสามารถลดการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ส่วนคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V พบปริมาณคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I เล็กน้อย นอกจากนี้กำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ในขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกสัดส่วนผสมมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น เมื่อแช่น้ำทะเลถึง 5 ปี

คำสำคัญ: คอนกรีต / เถ้าถ่านหิน / น้ำทะเล / คลอไรด์ / ระยะหุ้ม / สนิมเหล็ก /
การซึมผ่านคอนกรีต

Abstract

In this study, compressive strength, chloride penetration profile, steel corrosion, and water permeability of concrete containing fly ash from NPS and Mae Moh power plants under sea water were investigated. Fly ash obtained from NPS was ground to have particles retained on sieve No. 325 of 2.0% and then 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) of concrete were varied as 0.45, 0.55 and 0.65. The 200-mm concrete cube specimens with steel bar of 12-mm in diameter and 50-mm in length embedded at the cover depth of 10, 20, 50, and 75 mm were cast. Concrete specimens were cured in fresh water for 28 days, and then they were placed to expose to tidal zone of sea water. The specimens were tested for compressive strength, chloride penetration profile, and steel corrosion at ages of 180 and 365 days of exposure in sea water. In addition, water permeability of concrete specimens was also investigated at 365 days exposure in sea water.

For Mae Moh fly ash concrete, Portland cement type I and V were used to cast concrete. Original and classified fly ashes were used to replace Portland cement type I at 0, 15, 25, 35, and 50% by weight of binder. Water to binder ratios were varied as 0.45, 0.55, and 0.65. The specimen preparation is similar to that of NPS fly ash concrete. These specimens were prepared from previous research. After the concretes were exposed to tidal zone for 4 and 5 years, the compressive strength, chloride penetration profile, and steel corrosion were investigated. In addition, water permeability of concrete was also tested at 5-year exposure in sea water.

The results showed that the compressive strength of NPS fly ash concrete tended to increase up to the age of 180 days, and it slightly decreased during 180 to 365-day exposure in sea water. Fly ash concrete was better resistant to chloride ingress than that of concrete without fly ash and the increase in fly ash replacement could reduce the chloride ingress into concrete. The rusty of embedded steel bar was not found in all fly ash concretes but it slightly occurred at cover depths of 10 and 20 mm in concrete without fly ash. The higher is the chloride content in concrete, the higher is the corroded of steel bar.

For Mae Moh fly ash concrete, the results showed the same trend with NPS fly ash concrete that the increase of replacement and fineness of fly ash in concrete could reduce the chloride penetration profile and corrosion of embedded steel bar. Besides, the concrete with Portland cement type I tended to have lower chloride penetration profile than that of Portland cement type V. Moreover, the compressive strength of concretes with Portland cement type I and V decreased, while those of fly ash concretes increased at 5-year exposure in sea water.

Keywords: Concrete / Fly Ash / Sea Water / Chloride / Covering / Rusted Steel /
Water Permeability

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยเรื่อง “ผลกระทบของน้ำทะเลต่อกอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอน. พี. เอส. และเถ้าถ่านหินแม่เมาะ” คณะผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างสูงต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนเพื่อใช้ในการศึกษาดังกล่าว ภายใต้โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต ตามสัญญาเลขที่ RDG4950006 รวมระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัยทั้งสิ้น 18 เดือน คือ ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2548 ถึง 31 มีนาคม 2550

ขอขอบคุณอย่างสูงต่อการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยในการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตและเก็บข้อมูลช่วง 3 ปีแรกของงานวิจัยในส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ตามโครงการ “การนำเถ้าถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์อย่างปลอดภัยจากสิ่งแวดล้อม” ซึ่งได้ดำเนินการตั้งแต่ พฤษภาคม 2543 ถึง มิถุนายน 2545 เป็นที่เรียบร้อยแล้ว

ขอขอบคุณ บริษัท เนชั่นเนล เพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด และ บริษัท ชิก้า (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งได้สนับสนุนตัวอย่างเถ้าถ่านหิน และสารเคมีผสมเพิ่ม ที่ใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือที่จำเป็นในการดำเนินงานวิจัย เจ้าหน้าที่ธุรการและช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี

คณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณคุณประสิทธิ์ อุตส่าห์พานิช คุณมณเฑียร ทิฆมาณิช คุณธวัชชัย สาสกุล คุณวิทวัส ทิพย์พิริยพงศ์ และคุณสุชาติ ละธงสินธุ์ ที่ได้ทำการเตรียมตัวอย่างตลอดจนทดสอบ และเก็บข้อมูลต่างๆ อย่างอุทิศสาหัส ซึ่งทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายผู้วิจัยหวังว่า รายงานวิจัยฉบับนี้จะป็นฐานข้อมูล ที่จะนำไปใช้แก้ปัญหาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลในประเทศไทย ให้เกิดความเสียหายน้อยลง และเกิดความคุ้มค่าในการใช้งานองค์อาคารดังกล่าว

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร	๑-๓
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
รายการตาราง	ซ
รายการรูปประกอบ	ฌ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 เนื้อหาของรายงานวิจัย	4
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ผลกระทบของน้ำทะเลต่อกอนกรีต	5
2.2 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์	6
2.3 การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต	15
2.4 วัสดุปอซโซลาน	16
2.5 ปฏิกริยาปอซโซลาน	17
2.6 เถ้าถ่านหิน	17
2.7 การป้องกันการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล	19
2.8 การศึกษาการกัดกร่อนของน้ำทะเลต่อกอนกรีต	20

3. วิธีการศึกษา	22
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	22
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	22
3.3 วิธีการศึกษา	26
 4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	 41
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน	41
4.2 คุณสมบัติของมวลรวม	46
4.3 คุณสมบัติของน้ำทะเล	47
4.4 สภาพผิวหน้าคอนกรีตเมื่อแช่ในน้ำทะเล	48
4.5 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	50
4.6 การทดสอบคลอไรด์ในคอนกรีต	61
4.7 การสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต	73
4.8 การทดสอบการซึมผ่านคอนกรีต	86
 5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	 89
5.1 สรุปผลการวิจัย	89
5.2 ข้อเสนอแนะ	90
 เอกสารอ้างอิง	 91
 ภาคผนวก	 96

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 ปฏิภาศส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ที่บดละเอียด	31
3.2 ปฏิภาศส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ	32
3.3 สัญลักษณ์ของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา	40
4.1 ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย	44
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย	46
4.3 คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. และคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ	47
4.4 คุณสมบัติของน้ำทะเล	48
4.5 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ซึ่งบ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน และ 12 เดือน และที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 6 และ 12 เดือน	52
4.6 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ซึ่งแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี	58
4.7 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส.	62
4.8 พื้นที่ผิวแห้งหลักที่เกิดสนิมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส.	74
4.9 พื้นที่ผิวหลักที่เกิดสนิมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ	82
4.10 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ที่แช่น้ำทะเล 365 วัน	86
4.11 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ที่แช่น้ำทะเล 5 ปี	88

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต	7
3.1 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต	23
3.2 เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ	23
3.3 เครื่องทดสอบการซึมผ่านคอนกรีต	24
3.4 เครื่องบดวัสดุ	24
3.5 เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคด้วยแรงลม	25
3.6 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 20 ซม.	25
3.7 แบบฝังเหล็กเส้นกลมลงในคอนกรีต	26
3.8 แบบสำหรับฝังเหล็กลงในคอนกรีต รูปแบบที่ 1	30
3.9 แบบสำหรับฝังเหล็กลงในคอนกรีต รูปแบบที่ 2	30
3.10 การฝังเหล็กลงในคอนกรีต	33
3.11 สถานที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา	34
3.12 คอนกรีตที่ได้จากการเจาะ	36
3.13 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต	37
3.14 การตัดตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการซึมผ่านคอนกรีต	39
3.15 ชุดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีต	39
4.1 ลักษณะทั่วไปและสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าถ่านหิน	42
4.2 ภาพขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง	43
4.3 ภาพขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทห้า	43
4.4 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส. ที่ได้จากโรงงานโดยตรง	43
4.5 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส. ที่ผ่านการบดละเอียด	43
4.6 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ที่ได้จากโรงงานโดยตรง	43
4.7 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ที่ผ่านการคัดแยกขนาดอนุภาค	43
4.8 สภาพผิวคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ที่ผ่านการแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 365 วัน	49

4.9	สภาพผิวคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ผ่านการแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี	50
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. W/B ratio = 0.45 ซึ่งแช่ในน้ำทะเล	53
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. W/B ratio = 0.55 ซึ่งแช่ในน้ำทะเล	54
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. W/B ratio = 0.65 ซึ่งแช่ในน้ำทะเล	54
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ในปูนซีเมนต์ ของคอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.45	55
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ในปูนซีเมนต์ ของคอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.55	56
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ในปูนซีเมนต์ ของคอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.65	56
4.16	กำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 3, 4 และ 5 ปี	59
4.17	กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่แยกขนาด เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 3, 4 และ 5 ปี	60
4.18	ร้อยละของกำลังอัดคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่แช่น้ำทะเล 5 ปี ต่อกำลังอัดที่อายุ 28 วัน	61
4.19	ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ซึ่งแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน ที่ระยะความลึกต่างๆ	64
4.20	ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ซึ่งแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 365 วัน ที่ระยะความลึกต่างๆ	65
4.21	ผลกระทบของกำลังอัดต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ ที่แช่น้ำทะเล 365 วัน เมื่อผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ร้อยละ 0 และ 50	66
4.22	ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล	68
4.23	ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะเมื่อแช่ในน้ำทะเล 4 ปี	69

4.24	ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะเมื่อแช่น้ำทะเล 5 ปี	70
4.25	ผลของความละเอียดของเถ้าถ่านหินแม่เมาะต่อปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเมื่อแช่น้ำทะเล 5 ปี	72
4.26	ลักษณะการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเอ็น. พี. เอส. W/B ratio = 0.45 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 1 ซม.	75
4.27	ลักษณะการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเอ็น. พี. เอส. W/B ratio = 0.55 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 1 ซม.	76
4.28	ลักษณะการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเอ็น. พี. เอส. W/B ratio = 0.65 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 1 ซม.	77
4.29	ลักษณะการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเอ็น. พี. เอส. W/B ratio = 0.55 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 2 ซม.	78
4.30	ลักษณะการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเอ็น. พี. เอส. W/B ratio = 0.65 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 2 ซม.	79
4.31	เหล็กที่ฝังในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ที่มี W/B ratio เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 กับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่มี W/B ratio เท่ากับ 0.45 ที่ระยะหุ้ม 10 มม. เมื่อแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี	81
4.32	เหล็กที่ฝังในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V เมื่อแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี	83
4.33	เหล็กที่ฝังในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ที่มี W/B ratio เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 กับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่มี W/B ratio เท่ากับ 0.65	84
4.34	เหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ผ่านการคัดแยกขนาดและไม่ผ่านการคัดแยกขนาด เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี	85

- | | | |
|------|---|----|
| 4.35 | ความสัมพันธระหว่างอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์กับ
ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน
เอน. พี. เอส. ที่แช่น้ำทะเล 365 วัน | 87 |
| 4.36 | ความสัมพันธระหว่างอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์กับ
ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน
แม่เมาะ ที่แช่น้ำทะเล 5 ปี | 88 |

บทที่ 1 บทนำ

บทนี้เป็นกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล วัตถุประสงค์ ขอบเขตการศึกษา และแนวทางการศึกษาของงานวิจัยนี้

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับน้ำทะเลหรืออยู่บริเวณชายฝั่ง จะประสบปัญหาความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนที่ค่อนข้างรุนแรง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงกระแทกของคลื่น กระวด ทราบความแปรปรวนของน้ำทะเล ความชื้น อุณหภูมิ น้ำขึ้น-ลง และทิศทางการพัดพาของคลื่น เป็นต้น ปัจจัยทางกายภาพเหล่านี้ ทำให้เกิดการสึกกร่อนบริเวณผิวหน้าของคอนกรีต ส่งผลต่อเนื่องให้เกิดกระบวนการกัดกร่อนทางเคมีได้ง่ายขึ้น อีกทั้งในน้ำทะเลมีเกลือของสารเคมีหลายชนิดละลายอยู่ โดยเฉพาะเกลือของซัลเฟตและคลอไรด์ ซึ่งมีความเข้มข้นสูงในน้ำทะเล ซึ่งการกัดกร่อนของซัลเฟตจะทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวในเบื้องต้น และเกิดการแตกร้าวตามมา ทำให้คอนกรีตสูญเสียความสามารถในการรับกำลัง ส่วนการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ แม้ไม่ได้ทำอันตรายต่อคอนกรีตโดยตรง แต่คลอไรด์เมื่อซึมเข้าไปในคอนกรีต จะทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม เกิดการขยายตัว และทำให้คอนกรีตบริเวณรอบเหล็กเสริมเกิดการแตกร้าวในที่สุด สิ่งต่างๆเหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเสียหาย และก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมที่สูงตลอดจนความไม่คุ้มค่าในการใช้งานโครงสร้างดังกล่าว

การป้องกันปัญหาการกัดกร่อนจากน้ำทะเลมีด้วยกันหลายวิธี แต่ละวิธีก็มียค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกันไปตามกระบวนการขั้นตอนการดำเนินงาน การนำวัสดุพอลิโพรไพลีนมาเป็นส่วนผสมในคอนกรีตก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจ โดยเจ้าถ่านหินเป็นวัสดุพอลิโพรไพลีนที่นิยมนำมาเพิ่มความทนทานของคอนกรีตตามแนวความคิดของการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตสมัยใหม่ มีงานวิจัยหลายชิ้นที่กล่าวถึง การใช้เจ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น ทั้งในเรื่องของกำลังอัด ความสามารถในการซึมผ่านคอนกรีต ตลอดจนกลไกทางปฏิกิริยาเคมีที่ช่วยเกื้อหนุนให้คอนกรีตมีความทนทานสูงขึ้น แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการศึกษาถึงผลการใช้วัสดุพอลิโพรไพลีนในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาพแวดล้อมทะเลจริงในประเทศไทยมีน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับต่างประเทศ และประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้น ซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้ฐานข้อมูลของต่างประเทศที่มีอยู่ได้ จึงมีความจำเป็นต้องทำการศึกษาและเก็บ

ข้อมูลการใช้เถาถ่านหิน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีอยู่ในประเทศมาใช้ประโยชน์ เพื่อหาแนวทางป้องกันการกัดกร่อนของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเลจริงที่เกิดขึ้นในประเทศไทย

เถาถ่านหิน จากบริษัท เนชั่นแนล เพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด (โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า เอ็น. พี. เอส.) ตั้งอยู่ที่ อำเภอศรีมหาโพธิ จังหวัดปราจีนบุรี เป็นแหล่งเถาถ่านหินที่ตั้งอยู่ในเขตภาคตะวันออกใกล้กับกรุงเทพมหานคร มีข้อได้เปรียบเถาถ่านหินจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ในเรื่องค่าขนส่ง วัตถุดิบที่ถูกกว่า อีกทั้งบริษัท เนชั่นแนล เพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด มีโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจำนวน 2 โรง คือ โรงที่ 7 และ 8 ใช้ถ่านหินบิทูมินัส และแอนทราไซต์เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระแสไฟฟ้าปริมาณวันละ 3,400 ตัน ทำให้ได้ผลพลอยได้เป็นเถาถ่านหิน 500 ถึง 600 ตันต่อวัน ซึ่งเป็นปริมาณที่ค่อนข้างสูง เหมาะสมที่จะทำการวิจัยและพัฒนา เพื่อนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมอย่างจริงจัง

สืบเนื่องจากการที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยแก่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อศึกษาเถาถ่านหินแม่เมาะ ตามโครงการวิจัยเรื่อง “การนำเถาถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์อย่างปลอดภัยจากสิ่งแวดล้อม” (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ, 2545) ซึ่งโครงการดังกล่าวได้ศึกษาถึงผลกระทบของสถานะแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตอนบน (จังหวัดชลบุรี) ต่อการกัดกร่อนในคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหินแม่เมาะ โดยเริ่มโครงการตั้งแต่วันที่ 29 พฤษภาคม 2543 และสิ้นสุดโครงการในเดือนมิถุนายน 2545 ทางคณะผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาตามขอบเขตของงานวิจัยและบรรลุตตามวัตถุประสงค์ ตลอดจนจัดทำรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เสนอแก่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยแล้วนั้น เพื่อให้ข้อมูลในการศึกษาด้านความคงทนซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในงานคอนกรีตมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น จึงจำเป็นต้องใช้เวลาในการเก็บข้อมูลระยะยาวเพื่อให้สามารถสรุปได้ชัดเจน รวมไปถึงเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการนำไปใช้งานจริง ซึ่งขณะนี้นงานวิจัยดังกล่าวได้ทำการเก็บข้อมูลถึงระยะเวลา 3 ปี และวางแผนที่จะทำการเก็บข้อมูลต่อเนื่องที่ระยะเวลา 4 ปีและ 5 ปีตามลำดับ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบเนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่ส่งผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่อยู่ในสถานะแวดล้อมทะเล
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลการกัดกร่อนและการเกิดสนิมเหล็ก อันเนื่องมาจากการใช้ปริมาณเถาถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งในปริมาณที่แตกต่างกัน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้เถาถ่านหิน ที่มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีต

- 1.2.4 เพื่อศึกษาความเหมาะสมในการเลือกใช้ระยะหุ้มคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เพื่อดำเนินการ
กักกรองเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเล

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ มุ่งศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลที่มีต่อเหล็กเสริมในคอนกรีต โดยให้ความสนใจคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลจริง ซึ่งมีสภาวะเปียกและแห้งสลับกัน อันเนื่องมาจากน้ำขึ้น-ลง วัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตในการศึกษารั้งนี้ คือ เถ้าถ่านหินจาก 2 แหล่งผลิต ได้แก่ เถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ซึ่งได้จากการเผาถ่านหินประเภทบิทูมินัส และแอนทราไซค์ และเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ซึ่งเป็นผลผลิตจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ มีขอบเขตของการศึกษาดังต่อไปนี้

คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ที่บดละเอียดจนมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 2.0

ตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการวิจัย มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ใช้เถ้าถ่านหินที่ผ่านการบด แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 20 ซม. เพื่อฝังเหล็กเส้นกลมให้มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. ควบคุมค่ายุบตัวให้อยู่ในช่วง 5-10 ซม. หากการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด จะใช้สารลดน้ำพิเศษ ประเภทซัลโฟเนตเมลามีนฟอร์มาดีไฮด์คอนเดนเซตช่วยในการเพิ่มความสามารถได้ และได้ทำการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบต่อเนื่องจนถึงระยะเวลา 10 ปี

เก็บตัวอย่างคอนกรีตที่อายุการแช่น้ำทะเล 180 และ 365 วัน เพื่อทดสอบกำลังอัด ทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าสู่คอนกรีต พร้อมทั้งวัดพื้นที่การเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ระยะหุ้มต่างๆ และทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำผ่านคอนกรีต

คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

งานวิจัยในส่วนนี้เป็นการเก็บผลการทดสอบต่อเนื่องจากงานวิจัยที่เคยทำการศึกษาให้กับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยในโครงการวิจัยนี้จะเก็บผลการศึกษาหลังจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะผ่านการแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 4 ปี และ 5 ปี ทดสอบกำลังอัด ทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าสู่คอนกรีต พร้อมทั้งวัดพื้นที่การเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ระยะหุ้มต่างๆ และทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำผ่านคอนกรีต

1.4 เนื้อหาของรายงานวิจัย

บทที่ 2 ของรายงานวิจัยฉบับนี้กล่าวถึงผลกระทบของน้ำทะเลที่มีต่อคอนกรีต กลไกการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ที่ส่งผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิม การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต วัสดุปอซโซลานและปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลต่อคอนกรีต เถ้าถ่านหิน หลักการป้องกันการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้า ซึ่งประกอบด้วย วัสดุและการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการศึกษา อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ การทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม การเตรียมตัวอย่างเถ้าถ่านหิน และเหล็กเส้นที่ใช้ฝังลงในคอนกรีต การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต ก่อนที่จะนำคอนกรีตไปแช่น้ำทะเล วิธีการทดสอบสารประกอบคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีต วิธีการทดสอบความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต และการทดสอบการซึมผ่านคอนกรีต

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้จากการวิจัย ในเรื่อง คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน คุณสมบัติของมวลรวม คุณสมบัติของน้ำทะเล สภาพผิวหน้าคอนกรีตเมื่อแช่ในน้ำทะเล การทดสอบกำลังรับแรงอัด การทดสอบคลอไรด์ การทดสอบความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต และการทดสอบการซึมผ่านคอนกรีต

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์ ต่อการพัฒนาแนวทางในการนำเถ้าถ่านหินไปใช้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล

เอกสารอ้างอิงต่างๆ ที่ใช้ประกอบในการศึกษาค้นคว้า

ภาคผนวกแสดงบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ และบทคัดย่อของบทความที่อยู่ระหว่างการพิจารณา

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่ผ่านมา

บทนี้กล่าวถึงผลกระทบของน้ำทะเลที่มีต่อคอนกรีต กลไกการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ที่ส่งผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิม การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต วัสดุปอซโซลาน ปฏิริยาปอซโซลาน เถ้าถ่านหิน การป้องกันการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผลกระทบของน้ำทะเลต่อคอนกรีต

คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเลหรืออยู่ใกล้กับน้ำทะเลย่อมได้รับความเสียหายทั้งทางกายภาพและทางเคมี เช่น การกัดกร่อนของสารเคมี การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีต การแข็งตัวและการละลายของน้ำในคอนกรีตที่เกิดขึ้นสลับกันไป สภาพภูมิอากาศที่มีไอเกลือระเหยอยู่ และการสึกกร่อนเนื่องแรงกระแทกของคลื่น กรวด ทวาย รูปแบบของความเสียหายขึ้นอยู่กับสถานที่ตั้งของคอนกรีตที่สัมผัสกับระดับน้ำทะเล

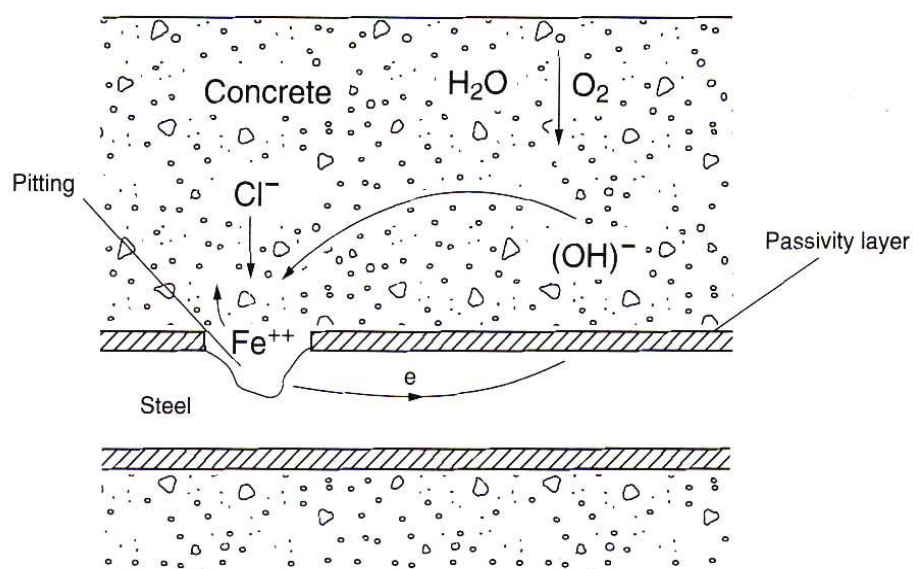
การกัดกร่อนทางเคมีของน้ำทะเลต่อคอนกรีต เกิดขึ้นจากการที่น้ำทะเลประกอบด้วยสารละลายของเกลือหลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่มีผลต่อความทนทานของคอนกรีต เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และโพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) ซึ่งความเข้มข้นของเกลือเหล่านี้จะมีค่าไม่เท่ากันในน้ำทะเลแต่ละบริเวณ เนื่องจากความแตกต่างของสภาพแวดล้อมทางภูมิประเทศ และสภาพภูมิอากาศ โดยทั่วไปผลรวมปริมาณเกลือทั้งหมดมีค่าประมาณ 35 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ น้ำทะเลยังมีก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ด้วย ค่า pH ของน้ำทะเลมีค่าอยู่ประมาณ 7.5 ถึง 8.4 การแทรกซึมของน้ำทะเลเข้าไปในคอนกรีตอาจทำให้ค่า pH ของคอนกรีตลดลงบ้าง โดยค่า pH ของคอนกรีตที่ต่ำที่สุด มีค่าประมาณ 12.0 (Gjorv และ Vennesland, 1976)

ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเนื่องจากการกัดกร่อนของน้ำทะเล พบว่าในโครงสร้างเดียวกันจะมีความรุนแรงไม่เท่ากันในแต่ละส่วน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงความหลากหลายของโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมน้ำทะเล ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 บริเวณ ดังนี้

1. บริเวณบรรยากาศของทะเล (Marine atmospheric zone) คอนกรีตในบริเวณนี้ไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง แต่สัมผัสกับไอของน้ำทะเลที่ลมพัดพามา ระดับความเข้มข้นของคลอไรด์จะลดลงตามระยะห่างจากน้ำทะเล ซึ่งแม้แต่คอนกรีตที่อยู่บนฝั่งห่างจากชายทะเลเข้ามาหลายกิโลเมตร ก็ยังมีโอกาสได้รับไอเกลือดังกล่าว ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตบริเวณนี้ เกิดจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ซึ่งส่งผลให้เหล็กเสริมเป็นสนิม
2. บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash zone) เป็นบริเวณที่อยู่เหนือระดับน้ำขึ้นสูงสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะเปียกชื้นเนื่องจากคลื่นและละอองน้ำทะเล ความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้ จะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์สูงสุด เนื่องจากคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง ทำให้คลอไรด์สามารถซึมเข้าไปสู่เหล็กเสริมได้เร็วขึ้น อีกทั้งยังเกิดการสึกกร่อนเนื่องจากการกระทำของคลื่น คอนกรีตบริเวณนี้มีความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนมากเนื่องจากน้ำทะเลมากที่สุด
3. บริเวณระหว่างระดับน้ำขึ้นสูงสุดและน้ำลงต่ำสุด (Tidal zone) คือ บริเวณที่อยู่ระหว่างน้ำขึ้นสูงสุดและน้ำลงต่ำสุด โดยคอนกรีตจะจมอยู่ใต้น้ำทะเลเป็นช่วงๆ ในแต่ละวัน นั่นคือคอนกรีตจะจมอยู่ใต้น้ำในชว่วนเวลาน้ำขึ้น และในช่วงเวลาน้ำลงคอนกรีตจะมีลักษณะคล้ายกับบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล คอนกรีตบริเวณนี้จะสึกกร่อนเนื่องจากการขัดสีของคลื่น การกัดกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ การกัดกร่อนเนื่องจากการเสื่อมสภาพทางชีวภาพ (Biological fouling)
4. บริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged zone) เป็นบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำลงต่ำสุด ซึ่งคอนกรีตจะแช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา ความเสียหายของคอนกรีตเกิดจากการกัดกร่อนทางเคมี การเกิดสนิมของเหล็กเสริมจะพบได้น้อยเนื่องจากไม่มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยา การเสื่อมสภาพทางชีวภาพ การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิตบางชนิด

2.2 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

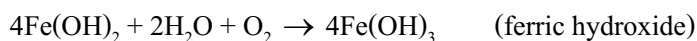
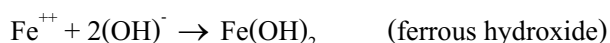
คลอไรด์เป็นตัวการหลัก ที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม และเป็นผลให้คอนกรีตบริเวณรอบเหล็กเสริมเสียหายเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมที่เป็นสนิม กลไกการกัดกร่อนเริ่มต้นจากเมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดฟิล์มบางๆ ของ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ เคลือบผิวเหล็กที่ฝังในคอนกรีตไว้ ฟิล์มออกไซด์นี้จะทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสนิม อย่างไรก็ตามไอออนของคลอไรด์ก็สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ และเมื่อมีน้ำและออกซิเจนมาสัมผัสกับเหล็กเสริมบริเวณที่ไม่มีฟิล์มออกไซด์ปกป้องกันอยู่ เหล็กก็จะเป็นสนิม



รูปที่ 2.1 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต (Neville, 1996)

การเกิดสนิมในเหล็กเกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของเหล็กเสริมในคอนกรีต ทำให้เกิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีขึ้น มีขั้วบวก (Anode) และขั้วลบ (Cathode) เชื่อมกันโดยน้ำซึ่งมีคลอไรด์ในโพรงของซีเมนต์ ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ประจุไฟฟ้าบวกเฟอร์รัสไอออน Fe^{++} ที่ขั้วบวกจะวิ่งไปสู่สื่ออิเล็กโทรไลต์ ขณะที่อิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าลบ e^- วิ่งตามเหล็กเสริมไปที่ขั้วลบ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะรวมกับน้ำและออกซิเจนทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งวิ่งผ่านสื่ออิเล็กโทรไลต์ไปรวมกับ Fe^{++} ทำให้เกิด $Fe(OH)_2$ และทำปฏิกิริยาออกซิเดชันจนทำให้เกิดสนิม ดังรูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาดังกล่าว แสดงดังสมการต่อไปนี้

anodic reactions:



cathodic reaction:

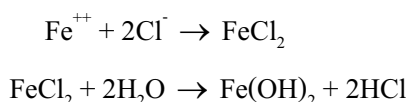


จากสมการข้างต้น เมื่อออกซิเจนถูกใช้จนหมดไป น้ำก็สามารถอุปฏิกิริยาขึ้นมาใหม่ได้ แต่จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการเกิดที่ต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้จึงไม่เกิดการกัดกร่อนในคอนกรีตที่แห้งตลอดเวลา ซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ต่ำกว่าร้อยละ 60 หรือคอนกรีตที่จมอยู่ในน้ำ

ทะเล ซึ่งไม่มีโอกาสได้สัมผัสกับอากาศ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมที่จะเกิดการกัดกร่อน อยู่ในช่วงร้อยละ 70 ถึง 80 ถ้าความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่านี้ จะทำให้ออกซิเจนแพร่เข้าไปในคอนกรีตได้น้อยลง

ความต่างศักย์ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี สามารถเกิดขึ้น เมื่อคอนกรีตมีสภาพที่แตกต่างกัน เช่น ส่วนหนึ่งของคอนกรีตจมน้ำทะเลตลอดเวลา แต่อีกส่วนหนึ่งต้องสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นระยะๆ ในบางกรณีความต่างของระยะหุ้มคอนกรีตส่งผลถึงการเชื่อมต่อของสื่อไฟฟ้าเคมี มีผลทำให้เกิดความต่างศักย์ รวมไปถึงความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือของน้ำในโพรงคอนกรีตด้วย

สำหรับการกัดกร่อนในช่วงต้น ฟิสิกส์บางจะถูกเจาะ โดยคลอไรด์ไอออนจะกระตุ้นให้ผิวเหล็กเสริมกลายเป็นขั้วบวก พื้นผิวด้านที่ไม่ถูกกระตุ้นก็จะมีสภาพเป็นขั้วลบ ดังสมการต่อไปนี้



เนื่องจาก คลอไรด์ไอออนเป็นเป็นตัวก่อให้เกิดปฏิกิริยาอีกครั้ง ดังนั้น สนิมเหล็กที่เกิดขึ้นจึงไม่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ แม้ว่าเฟอรัสคลอไรด์จะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเซลล์ไฟฟ้าเคมี มีความจำเป็นต้องใช้น้ำในโพรงของคอนกรีตเป็นตัวกลางเชื่อมระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ ระบบโพรงของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวในคอนกรีตเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกัดกร่อน เนื่องจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยน้ำที่อยู่ในโพรงเป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ทำให้เหล็กเสริมเกิดการขยายตัว ปริมาตรเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดรอยแตก (Cracking) การหลุดล่อน (Spalling) ไปจนถึงคอนกรีตกับเหล็กเสริมไม่มีแรงยึดเหนี่ยวต่อกัน (Delamination) ในขณะที่เกิดการกัดกร่อนพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมที่ทำหน้าที่เป็นขั้วบวกจะมีขนาดเล็กลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดรูขนาดเล็บบนเหล็กเสริม

2.2.1 ปริมาณคลอไรด์ในปฏิภาณส่วนผสม

ปริมาณคลอไรด์ที่พบในคอนกรีต อาจมีสาเหตุมาจาก การใช้มวลรวมที่ไม่สะอาด หรือคอนกรีตนั้นสัมผัสกับน้ำทะเล น้ำกร่อย หรือการใช้สารเคมีผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ จากสาเหตุข้างต้นทำให้ มาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กของประเทศต่างๆ อนุญาตให้มีปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำไม่เกินค่าที่กำหนด เช่น BS 8110 Part 1 กำหนดปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride-

ion) ในคอนกรีตเสริมเหล็กไม่เกินร้อยละ 0.40 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ACI 318-89 ใช้ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water-soluble Chloride ions) เป็นตัวหลักในการพิจารณา โดยกำหนดให้ปริมาณคลอไรด์ไม่ควรเกินร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนักของของปูนซีเมนต์ โดยหลักใหญ่ใจความ คำทั้งสองนี้ ไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจาก ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำเป็นส่วนหนึ่งของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด บางครั้งคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ เรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free chloride) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสามารถหาได้โดยวิธีทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1152-90 หรือ BS 1881 Part 124

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

2.2.2 การซึมผ่านของคลอไรด์

ปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์สามารถเกิดขึ้นได้เสมอ เมื่อคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีต โดยเฉพาะในกรณีที่คอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเล คลอไรด์ที่พบ มีแหล่งที่มาจากน้ำทะเลนั่นเอง โดยคลอไรด์จะตกค้างบนผิวหน้าคอนกรีตในรูปของไอเกลือของน้ำทะเลที่มีขนาดเล็ก ซึ่งถูกพัดพามากับคลื่นและกระแสนลม หรืออาจอยู่ในรูปของละอองน้ำทะเล ซึ่งทำให้คอนกรีตมีสภาพเปื่อยขึ้นเนื่องจากละอองน้ำทะเล ไอของคลอไรด์ สามารถพัดพาไปได้ไกลถึง 2 กิโลเมตร ตามรายงานของ Nireki (1987) แต่การเคลื่อนที่ของไอคลอไรด์ขึ้นอยู่กับกระแสนลมและสภาพภูมิประเทศ น้ำใต้ดินหรือน้ำกร่อย (Brackish groundwater) ที่สัมผัสกับคอนกรีต ก็ล้วนเป็นแหล่งที่มาของคลอไรด์

อย่างไรก็ตาม คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีตได้ โดยอาศัยน้ำเป็นตัวนำพา และเมื่อคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง มีผลทำให้บริเวณผิวเหล็กเสริมเกิดการสะสมของคลอไรด์ไอออนในปริมาณที่สูง

เมื่อคอนกรีตจมอยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา ก็ย่อมเกิดการซึมผ่านของคลอไรด์ แต่บริเวณใต้น้ำทะเลมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยและอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจาก

ช่องว่างภายในคอนกรีตเป็นช่องว่างที่อึดตัวด้วยน้ำ ทำให้ไม่มีออกซิเจนที่จะไปรวมตัวกับน้ำและอิเล็คตรอนที่ขั้วลบ สำหรับคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง ปริมาณคลอไรด์ที่พบในคอนกรีตจะสูงขึ้น ซึ่งพบมากกับโครงสร้างที่ตั้งอยู่ตามชายฝั่ง ในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น

เมื่อคอนกรีตเริ่มสัมผัสกับน้ำทะเล คอนกรีตจะดูดซับน้ำทะเลจนกระทั่งคอนกรีตนั้นอึดตัวไปด้วยน้ำ และถ้าหากสภาพภายนอกคอนกรีตเปลี่ยนเป็นสภาพแห้ง ทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำจะเกิดการเคลื่อนที่ย้อนกลับ และระเหยออกจากคอนกรีต ทำให้เกลือเกลือตกค้างในช่องว่าง เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกครั้ง ความเข้มข้นของเกลือบริเวณใกล้ผิวหน้าจะสูงขึ้น โดยเกลือที่มีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะเกิดการถ่ายเทไปยังบริเวณภายในที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า เรียกการถ่ายเทเทคนิคนี้ว่า การแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและแห้ง ส่งผลให้เกลือยังสามารถแพร่เข้าไปในคอนกรีตและเข้าไปสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น ความสามารถในการแพร่ของเกลือนั้น ขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกคอนกรีต และช่วงระยะเวลาที่คอนกรีตแห้งตัว

โดยทั่วไป คอนกรีตจะเปียกได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก ทำให้ภายในของคอนกรีตไม่สามารถแห้งโดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลตลอดเวลา จึงเกิดขึ้นได้ช้ากว่าคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง

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

2.2.3 ปริมาณคลอไรด์ที่กระตุ้นให้เหล็กเริ่มเกิดสนิม

กระบวนการการกัดกร่อนของเหล็กเสริม เริ่มต้นเมื่อมีปริมาณคลอไรด์เพียงเล็กน้อยที่ผิวเหล็ก แต่เป็นการยากที่จะกล่าวว่า ปริมาณหรือความเข้มข้นของคลอไรด์เท่าใด ที่จะกระตุ้นให้เหล็กเสริมเป็นสนิม เนื่องจากขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งยังไม่สามารถอธิบายให้ชัดเจนได้ ยิ่งไปกว่านั้น การแพร่ของคลอ

ไคลด์เข้าไปยังซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว มีรูปแบบที่ไม่แน่นอน ภายในห้องปฏิบัติการ มีการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการซึมผ่านของคลอไรด์ในรูปของรูปตัดตามยาว (Chloride profiles) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีป้องกันการเกิดสนิมอันเนื่องจากการซึมผ่านของคลอไรด์ ซึ่งจะใช้วิธีพิจารณาหาระยะหุ้มที่เหมาะสมสำหรับเหล็กเสริม

ในปริมาณคลอไรด์ที่เท่ากัน คอนกรีตที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ในปฏิภาคส่วนผสมตั้งแต่เริ่มต้น จะเกิดอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมสูงกว่าคอนกรีตที่มีการซึมผ่านของคลอไรด์หลังจากคอนกรีตนั้นมีการใช้งานไปแล้ว (Lambert, et al., 1991)

ขณะที่เกิดกระบวนการซึมผ่านของคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์ที่สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตขึ้นอยู่กับความสามารถในการต้านทานของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว, การเปลี่ยนแปลงความชื้น และปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นผลเนื่องจากลักษณะของการแช่คอนกรีต

ในกรณีทั่วไป ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดไม่ได้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความรุนแรงของการกัดกร่อน แต่คลอไรด์ทั้งหมดสามารถจำแนกออกได้ 3 ส่วน คือ Chemically bound ซึ่งรวมอยู่ในผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ อีกส่วนหนึ่ง คือ Physically bound ซึ่งติดอยู่ที่ผิวโพรงของเจล (Gel pores) และส่วนสุดท้าย เรียกว่า คลอไรด์อิสระ ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเกิดสนิมของเหล็กอย่างสูง อย่างไรก็ตาม การกระจายตัวของคลอไรด์ไอออนทั้ง 3 ชนิด ไม่สามารถคงอยู่ได้ในสถานะเดิมตลอดเวลา แต่สามารถปรับเปลี่ยนเพื่อให้ไอออนทั้งหมดอยู่ในสภาวะสมดุล เช่น ตามปกติคลอไรด์อิสระจะพบตามน้ำที่อยู่ในช่องว่าง (Pore water) ของคอนกรีต ถ้าคลอไรด์อิสระมีปริมาณที่มากเกินไปจนความจำเป็น คลอไรด์อิสระนั้นจะกลายสภาพไปเป็นคลอไรด์ยึดจับ เพื่อให้ไอออนอื่นๆ อยู่ในสภาวะสมดุล

2.2.4 การดักจับคลอไรด์ไอออน

การดักจับคลอไรด์ไอออนอยู่ในรูปปฏิกิริยาเคมีกับ C_3A ก่อให้เกิดแคลเซียมคลอโรลูมินเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) บางครั้งเรียกว่า เกลือของฟรีเดิล (Friedel's salt) ในลักษณะเดียวกัน คลอไรด์ก็ถูกดักจับโดย C_4AF ผลที่ได้คือ แคลเซียมคลอโรเฟอร์ไรต์ ($3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) ดังนั้น จากปฏิกิริยาข้างต้นคลอไรด์ไอออนจะถูกดักจับเมื่อปูนซีเมนต์มีปริมาณ C_3A สูง หรือ ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก ด้วยเหตุนี้ การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูง จะช่วยต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ได้ดี

ในขณะเดียวกัน การป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต มีความต้องการปริมาณ C_3A ต่ำ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อป้องกันความเสียหายจาก

ซัลเฟต และเพื่อป้องกันอันตรายจากคลอไรด์ในน้ำทะเลควบคู่กันไป ขณะที่ปัจจุบัน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสอง) ซึ่งสามารถทนซัลเฟตได้ปานกลาง และให้ความร้อนไม่สูงมากนัก เป็นอีกตัวเลือกในการนำไปใช้งาน บางครั้งการใช้ปูนซีเมนต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground granulated blastfurnace slag) ก็สามารถช่วยในการดักจับคลอไรด์ไอออน โดยอลูมินัมที่มีอยู่ในตะกรัน (Slag) ทำหน้าที่ในการดักจับ แต่งานวิจัยที่ศึกษาในเรื่องนี้ยังมีจำนวนน้อย (Bakker, 1988)

การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูง มีข้อจำกัดตรงที่ เมื่อ C_3A มีปริมาณสูงย่อมทำให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูง และทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้ง่าย พฤติกรรมดังกล่าวจึงกลายเป็นข้อด้อย และเป็นอันตรายต่อการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ที่ต้องสัมผัสกับน้ำทะเล (Hoff, 1991)

มาตรฐานการออกแบบ เช่น BS 8110 Part 1 กำหนดปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟต โดยมีแนวความคิดที่อยู่บนสมมติฐานที่ว่า คลอไรด์ส่งผลเสียต่อกระบวนการต้านทานซัลเฟต ซึ่งปัจจุบันได้มีการตรวจสอบสมมติฐานดังกล่าวแล้วว่าไม่ถูกต้อง (Harrison, 1990)

เมื่อกลับมาพิจารณาในเรื่อง ความเข้มข้นคลอไรด์ในน้ำที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต พบว่าที่สภาวะสมดุล ความเข้มข้นของคลอไรด์จะขึ้นอยู่กับไอออนอื่นๆที่กระจายตัวอยู่ในน้ำตามช่องว่าง เช่น ที่ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดค่าหนึ่ง ถ้าไฮดรอกไซด์ไอออนมีความเข้มข้นสูง คลอไรด์อิสระก็จะมี ความเข้มข้นสูงด้วย (Tritthart, 1989) ด้วยเหตุนี้ในบางครั้ง อัตราส่วนระหว่าง Cl^-/OH^- อาจใช้ในการพิจารณาถึงความก้าวหน้าของการกักคร่อน แต่ไม่ได้เป็นค่ามาตรฐานในการพิจารณาเรื่องดังกล่าว อีกทั้งมีการพบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในปฏิกิริยาส่วนผสม เกลือโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จะมีปริมาณคลอไรด์อิสระสูงกว่า เกลือแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) อย่างมีนัยสำคัญ (Al-Hussaini, 1990) นั่นหมายความว่า น้ำทะเลซึ่งมีเกลือโซเดียมคลอไรด์ละลายอยู่ จะเกิดกักคร่อนของเหล็กเสริมอย่างแน่นอน

เนื่องจากปัจจัยที่มีความหลากหลาย สัดส่วนของคลอไรด์ยึดจับจึงมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงร้อยละ 50 ถึง 80 หรืออาจต่ำกว่าร้อยละ 50 ของคลอไรด์ทั้งหมด ดังนั้น อาจจะไม่เป็นความจริงที่คลอไรด์ยึดจับที่อยู่ในคลอไรด์ทั้งหมดจะไม่ก่อให้เกิดการกักคร่อน จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Tritthart, 1989; Tang และ Nilsson, 1993) พบว่า ผลของความต้องการสภาวะสมดุลของน้ำในโพรงคอนกรีตที่แตกต่างกัน ทำให้น้ำหนักของคลอไรด์ยึดจับซึ่งมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ไม่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

2.2.5 อิทธิพลของปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานต่อการกัดกร่อน

ในหัวข้อก่อนหน้านี้นี้ได้มีการกล่าวถึงอิทธิพลทางเคมีของปูนซีเมนต์ประเภทต่างๆ ที่มีต่อคลอไรด์ไอออน ขณะเดียวกันการใช้ปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานก็ย่อมมีอิทธิพลต่อโครงสร้างโพรง (Pore structure) ในซีเมนต์เพสต์เช่นกัน ทั้งในแง่ของป้องกันการซึมผ่าน และการต้านทานการกัดกร่อน

เถ้าถ่านหิน ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และซิลิกาฟูม เป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งเมื่อนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในปฏิกิริยาคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตสามารถลดการซึมผ่านของสารเคมี เพิ่มการต้านทานการกัดกร่อน อีกทั้งช่วยลดอัตราการกัดกร่อน (Al-Amoudi, et al., 1993; Ellis, et al., 1991; Schiessl และ Raupach, 1989) ในส่วนของซิลิกาฟูม ให้ผลทางด้านบวกต่อโครงสร้างโพรงของซีเมนต์เพสต์ซึ่งมีความแน่นขึ้น ทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ซิลิกาฟูมสามารถลดความเป็นกรด-ด่างของน้ำในโพรง ซึ่งเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) (Byfors, 1987) การใช้วัสดุประสานตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ช่วยทำให้คอนกรีตที่มีโอกาสเกิดการกัดกร่อนในสภาพภูมิอากาศร้อน มีความทนทานมากขึ้น กว่าที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

2.2.6 ปัจจัยต่อเนื้อที่มีอิทธิพลต่อการกัดกร่อน

การบ่มคอนกรีต เป็นการทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นได้ต่อเนื่อง โครงสร้างของเนื้อซีเมนต์จะแน่นขึ้น ดังนั้น การให้ความสำคัญกับการบ่ม จึงเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้คอนกรีตสามารถต้านทานการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะบริเวณผิวหน้าคอนกรีต ที่น้ำสามารถระเหยออกได้ง่าย ในช่วงต้นของการกัดกร่อน คอนกรีตที่สามารถบ่มได้นานที่สุดเท่าที่จะทำได้ จะช่วยเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนได้ดี

รอยแตกร้าวบริเวณผิวหน้าคอนกรีตทำให้คลอไรด์สามารถซึมเข้าไปในคอนกรีตได้สะดวกยิ่งขึ้น และส่งผลให้คอนกรีตเกิดการกัดกร่อนสูงขึ้น แม้ว่าในสภาพการใช้งานจริงของโครงคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีรอยร้าวต่างๆ ปรากฏให้เห็น แต่รอยร้าวเหล่านี้ก็ถูกควบคุมโดยมาตรฐานการออกแบบ และขั้นตอนการควบคุมงานการก่อสร้าง รอยแตกที่มีขนาด 0.2 – 0.4 มม. (0.008 – 0.016 นิ้ว) จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีตโดยตรง

อุณหภูมิที่สูงย่อมส่งผลต่อการกัดกร่อน ประการแรก คือ คลอไรด์อิสระในน้ำตามโพรงจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นผลกระทบที่เด่นชัดต่อปูนซีเมนต์ที่มี C_3A สูง และต่อปฏิกิริยาคอนกรีตเสริมเหล็กเพิ่มขึ้นของคลอไรด์ต่ำ ประการต่อมา ปฏิกิริยาเคมีขณะเกิดการกัดกร่อน หลายปฏิกิริยาสามารถเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยปกติเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น 10°C (18°F) อัตราการ

เกิดปฏิกิริยาจะเร็วขึ้นสองเท่า แต่บางครั้งผลของการเพิ่มอุณหภูมิก็ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น 1.6 เท่า ก็สามารเห็นผลได้อย่างชัดเจน (Virmani, 1982) อย่างไรก็ตาม ปัจจัยเรื่องอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลต่อการเร่งการเกิดปฏิกิริยาการกักกร่อน สามารถเห็นภาพได้ชัดเจนจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลที่ตั้งในเขตภูมิอากาศร้อน จะเกิดความเสียหายมากกว่าสภาพภูมิอากาศอื่นบนโลก

เมื่อคอนกรีตที่เพิ่งแข็งตัว อยู่ในสภาพอุณหภูมิที่สูง จะทำให้โครงสร้างโพรงมีลักษณะหยาบ (Coarser pore structure) ทำให้ความสามารถในการต้านทานการแพร่ของคลอไรด์ไอออนลดลง (Detwiler, et al., 1991) ผลของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวหน้า และภายในคอนกรีต ส่งผลต่อการแพร่ของไอออน โดยทิศทางของแสงอาทิตย์มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิที่ผิวหน้ามากกว่าอุณหภูมิภายในคอนกรีต

2.2.7 ระยะหุ้มของเหล็กเสริมคอนกรีต

ระยะหุ้มของเหล็กเสริมคอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการส่งผ่านคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีต การมีระยะหุ้มที่เหมาะสมกับระยะเวลาการใช้งานคอนกรีต จะช่วยให้คลอไรด์ไม่สามารถเดินทางมาถึงผิวของเหล็กเสริมได้ ฉะนั้นความทึบแน่นของคอนกรีตและระยะหุ้มจึงเป็นปัจจัยอันดับต้นๆ ที่ควรคำนึงถึง ด้วยเหตุนี้ มาตรฐานการออกแบบเกือบทุกมาตรฐานจึงกำหนดทั้งระยะหุ้มขั้นต่ำ และกำลังของคอนกรีตที่ควรมีกำลังสูงกว่าปกติควบคู่กันไป

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดในเรื่องระยะหุ้ม อันดับแรก คือ ระยะหุ้มจะไม่มีประโยชน์ต่อการป้องกันเหล็กเสริม ถ้าคอนกรีตที่ใช้มีความพรุนสูง จนสารเคมีต่างๆ สามารถซึมเข้าไปได้ อนึ่ง จุดประสงค์ของการกำหนดระยะหุ้มไม่ได้มีไว้เพื่อป้องกันเหล็กเสริมเพียงอย่างเดียว แต่ช่วยทำให้มั่นใจได้ว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถรับแรงกระทำได้ รวมไปถึงการป้องกันอันตรายจากเพลิงไหม้ หรือต้านทานการสึกกร่อน การมีระยะหุ้มที่มากเกินไป เป็นผลมาจากคอนกรีตมีปริมาณมาก ซึ่งเสมือนว่าคอนกรีตนั้นไม่มีการเสริมกำลังด้วยเหล็กเสริม นอกจากนั้น ระยะหุ้มของเหล็กยังช่วยควบคุมการหดตัว (Shrinkage) และความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal stresses) รวมไปถึงช่วยป้องกันรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นจากความเค้น เมื่อเกิดรอยแตกขึ้น ระยะหุ้มที่มีความหนาเกินไปพิสูจน์แล้วว่าก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง ในทางปฏิบัติ ความหนาระยะหุ้มควรมีค่าไม่เกิน 80 ถึง 100 มม. (3 ถึง 4 นิ้ว) ซึ่งการตัดสินใจเลือกใช้ระยะหุ้ม ควรพิจารณาตามมาตรฐานการออกแบบที่กำหนดไว้

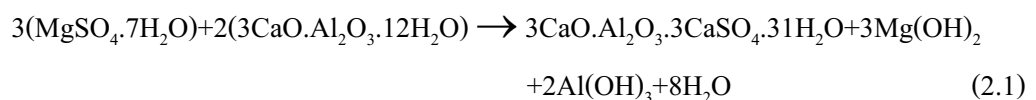
การเลือกใช้ระยะหุ้มที่มีความหนาน้อย อาจทำให้คลอไรด์สามารถซึมเข้าไปถึงเหล็กเสริมได้ง่าย เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อาจไม่มีความทึบน้ำ เกิดรอยแตก หรือในระหว่างการก่อสร้างวางเหล็กเสริม ผิดตำแหน่ง

2.3 การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต

เกลือซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำใต้ดิน เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4), โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4), แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) อำนาจการทำลายของซัลเฟตต่อคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟต และความชื้น การทำลายของซัลเฟตจะไม่แสดงออกเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่มีอำนาจรุนแรงเมื่อคอนกรีตเปียกชื้น และรุนแรงมากในกรณีที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง โดยสารละลายจะค่อยๆ ซึมเข้าไปภายในช่องว่างของเนื้อคอนกรีตและทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดการขยายตัวและแตกร้าวจนไม่สามารถรับกำลังได้

สารละลายซัลเฟตในน้ำทะเลที่กัดกร่อนคอนกรีตโดยตรงและรุนแรงคือ แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ซึ่งมีความเข้มข้นสูง และมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดีกว่าเกลือซัลเฟตอื่นๆ เมื่อแมกนีเซียมซัลเฟตจากน้ำทะเลแพร่กระจายเข้ามาในโพรงหรือช่องว่างระหว่างคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังต่อไปนี้ (Mather, 1966)

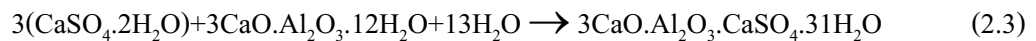
แมกนีเซียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไฮเดรต ได้สารประกอบ คือ แคลเซียมซัลโฟลูมินเนต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ 2.1



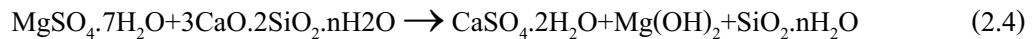
แมกนีเซียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้เป็นแคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม ดังสมการที่ 2.2



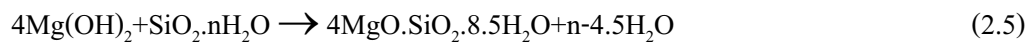
แคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัมที่ได้ สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้เป็นแคลเซียมซัลโฟลูมินเนต ดังสมการที่ 2.3



นอกจากนี้ แมกนีเซียมซัลเฟตยังทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ปฏิกิริยานี้เป็นการดึงแคลเซียม (Decalcification) จาก C-S-H ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซัลเฟต, แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาเจล ดังสมการที่ 2.4



แคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นในสมการที่ 2.4 สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมินไฮเดรตตามสมการ 2.3 ได้อีก ในที่สุดแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล เกิดเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ดังสมการที่ 2.5



ยิปซัมที่เกิดตามสมการ 2.2 และ 2.4 และแคลเซียมซัลโฟลูมินเนตที่เกิดตามสมการ 2.1 และ 2.3 มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าสารประกอบเดิม มีการขยายตัวทำให้มีปริมาตรมากขึ้น และเกิดแรงดันภายในคอนกรีตเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าวในที่สุด ส่วนซิลิกาเจลและแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเกิดตามสมการ 2.4 และ 2.5 เป็นสารที่ไม่แข็งแรงเท่ากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่สูญเสียไปตามสมการที่ 2.4 ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง การลดปริมาณของ C_3A ให้น้อยลง จะทำให้ปริมาณของแคลเซียมอลูมินไฮเดรตลดลง ส่งผลให้ปริมาณการเกิดยิปซัม แคลเซียมซัลโฟลูมินเนต และแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตลดลงตามไปด้วย จึงทำให้การกัดกร่อนของซัลเฟตลดลง ดังนั้น การใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A ต่ำ จึงสามารถลดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้

2.4 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ตามคำจำกัดความของ ASTM C 618 หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือ ซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดี คล้ายกับปูนซีเมนต์ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural

pozzolan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาวเผา (Metakaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่ง คือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial pozzolan) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟุ้ง เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าขานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น

ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตในรูปของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นทั้งในด้านความสามารถรับแรงอัด ความทนทานต่อการกัดกร่อน และความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตได้

2.5 ปฏิกริยาปอซโซลาน

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และมีผลิตภัณฑ์ที่สำคัญจากปฏิกิริยา คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 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) ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน (Fraay, et al., 1989) และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อยๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครึ่งก็ตาม (Hansen, 1990)

2.6 เถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหิน มีลักษณะเป็นผงละเอียด ขนาดอนุภาคตั้งแต่ 1-150 ไมโครเมตร มีสีเทา เทาดำ หรือสีน้ำตาล เกิดจากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม หรือในโรงงานไฟฟ้าพลังงานความร้อนเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า อนุภาคของเถ้าถ่านหินซึ่งมีน้ำหนักเบาจะถูกพัดออกตามปล่องควันพร้อมไอร้อนจากการเผาไหม้ และถูกดักจับด้วยเครื่องดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) จากนั้นจะถูกลำเลียงไปเก็บไว้ในไซโลเพื่อรวบรวมนำไปทิ้งหรือนำไปใช้ต่อไป

เถ้าถ่านหินจัดเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆ หลายชนิด โดยมีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ได้แบ่งเถ้าถ่านหินตามองค์ประกอบทางเคมีเป็น 2 ประเภท คือ Class F และ Class C โดยพิจารณาจากผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ กล่าวคือ เถ้าถ่านหิน Class F ต้องมีผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ส่วนใหญ่มักได้จากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์ หรือบิทูมินัส ส่วนเถ้าถ่านหิน Class C ต้องมีผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ อยู่ระหว่างร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก และส่วนใหญ่ได้จากการเผาถ่านหินประเภทลิกไนต์ หรือซับบิทูมินัส โดยทั่วไปเถ้าถ่านหิน Class F จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ค่อนข้างต่ำ คือ น้อยกว่าร้อยละ 5 ซึ่งบางครั้งเรียกว่า Low-Calcium Fly Ash ส่วนเถ้าถ่านหิน Class C จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ มากกว่าร้อยละ 10 และเรียกว่า High-Calcium Fly Ash ซึ่งมีคุณสมบัติของซีเมนต์ร่วมกับคุณสมบัติปอซโซลานในตัวเอง

เถ้าถ่านหินจาก บริษัท เนชั่นแนล เพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด (โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า เอ็น. พี. เอส.) อำเภอศรีมหาโพธิ จังหวัดปราจีนบุรี เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินประเภทบิทูมินัส และแอนทราไซต์ ซึ่งนำเข้ามาจากประเทศเวียดนามและอินโดนีเซีย มีระบบเผาไหม้แบบ Circulating Fluidized Bed Combustion ลักษณะของเตาเผาแบบนี้สามารถผสมถ่านหินกับวัสดุอื่นๆที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ (วัชระ เพิ่มชาติ และ สมพร ธนสวณิชย์, 2544) ซึ่งบางครั้งทางโรงงานก็ใช้เกลบเป็นเชื้อเพลิงเพิ่มเติม ขนาดของถ่านหินที่ใช้ ต้องมีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 8 มิลลิเมตร อุณหภูมิการเผาไหม้อยู่ระหว่าง $800-900^\circ\text{C}$ วัสดุเบด (Bed materials) ที่ใช้รักษาความร้อนในเตาเผาให้สม่ำเสมอ คือทราย ซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อยที่ทนความร้อนได้ดี ขณะเกิดกระบวนการเผาไหม้เถ้าถ่านหินจะถูกดักจับด้วยระบบดักจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

เถ้าถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ใช้ถ่านหินลิกไนต์ซึ่งมีปริมาณมากทางภาคเหนือ เป็นเชื้อเพลิงในการต้มน้ำจนกลายเป็นไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โรงไฟฟ้าแม่เมาะมีระบบเผาไหม้แบบ Pulverized Coal Combustion (PCC) ซึ่งมีอุณหภูมิการเผาไหม้มากกว่า $1,300^\circ\text{C}$ เถ้าถ่านหินจะถูกดักจับด้วย ESP ไปเก็บไว้ในไซโล

ในประเทศไทย เถ้าถ่านหินจัดเป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้รับการยอมรับ และเป็นที่ยอมรับนำไปใช้ในงานคอนกรีตอย่างแพร่หลาย อีกทั้งมีงานวิจัยมากมายรับรองคุณภาพ โดยเฉพาะเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ที่มีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง มีระบบตรวจสอบและควบคุมคุณภาพให้เถ้าถ่านหินที่ได้มีคุณภาพที่สม่ำเสมอ และมีปริมาณมากพอต่อความต้องการใช้ อีกทั้งมีระบบการจัดการเชิงพาณิชย์ที่ดี เป็นผลให้เกิดการยอมรับจากเจ้าของโรงปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. จากจังหวัดปราจีนบุรี ซึ่งเป็น

แหล่งเถ้าถ่านหินที่ตั้งอยู่ใกล้กรุงเทพมหานคร ทำให้เกิดข้อได้เปรียบเรื่องค่าขนส่งที่มีราคาถูกกว่าเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ซึ่งเป็นแหล่งเถ้าถ่านหินหลักที่ทุกอุตสาหกรรมการก่อสร้างนำไปใช้งาน ที่ต้องขนส่งมาจากจังหวัดลำปาง นอกจากนี้ บริษัท เนชั่นแนล เพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด มีโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจำนวน 2 โรง คือ โรงที่ 7 และ 8 ใช้ถ่านหินเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ปริมาณวันละ 3,400 ตัน ทำให้ได้ผลพลอยได้เป็นเถ้าถ่านหิน 500 ถึง 600 ตันต่อวัน ซึ่งถือว่าเป็นปริมาณที่ค่อนข้างสูง เหมาะสมที่จะผลักดันให้เกิดการนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรมอย่างจริงจัง

2.7 การป้องกันการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

บริเวณชายฝั่งทะเล

คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเล จำเป็นต้องกำหนดคุณภาพของคอนกรีตให้มีความทนทานสูงเป็นพิเศษ โดยพิจารณาถึงสภาพแวดล้อมทางภูมิประเทศและภูมิอากาศประกอบในการออกแบบ คอนกรีตดังกล่าวต้องเป็นคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง มีคุณสมบัติการซึมน้ำต่ำ ซึ่งหมายถึงการใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ มีการทำให้แน่นและบ่มคอนกรีตอย่างดีด้วยระยะเวลาที่นานเพียงพอ ในกรณีที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กต้องมีความหนาของระยะหุ้มเหล็กที่มากพอ รอยต่อของคอนกรีตต้องมีการออกแบบและก่อสร้างอย่างถูกต้อง กีดกันน้ำได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดี

ความเสียหายและความรุนแรงของการกัดกร่อนต่อคอนกรีตอาจไม่เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้างของคอนกรีต บริเวณคอนกรีตที่น้ำขึ้น-ลงมีการเสียหายสูง เพราะบริเวณดังกล่าวมีการขัดสีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตทั้งจากการกระแทกของคลื่นและการไหลเวียนของน้ำทะเล นอกจากนี้ คอนกรีตในบริเวณน้ำขึ้น-ลงมีการสะสมสารเคมีทั้งคลอไรด์ ซัลเฟต และเกลือต่างๆ ในช่องว่างของคอนกรีต ทำให้ความเข้มข้นสูงกว่าปกติจึงเกิดการกัดกร่อนที่รวดเร็ว

การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทห้า สามารถทนทานต่อสารละลายซัลเฟตได้ดี แต่การป้องกันเหล็กเสริมจากการเป็นสนิมเนื่องจากการแพร่ของคลอไรด์จะมีน้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทอื่น การใช้ปูนซีเมนต์ผสมตะกั่วแร่ธาตุสูงเหล็กบดละเอียดก็มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์และซัลเฟตได้สูง (Comite Euro-International Du Beton, 1992) ด้วยเหตุนี้ การเลือกปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม และการใช้วัสดุปอซโซลานผสมลงในคอนกรีต จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ

มาตรฐาน ACI 201.2R ได้กำหนดให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีซัลเฟตและคลอไรด์สูง มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ไม่เกิน 0.40 ถึง 0.45 และให้มีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 5 ถึง 6 ซม. เพื่อลดความเสี่ยงของการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

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

2.8 การศึกษาการกัดกร่อนของน้ำทะเลต่อคอนกรีต

ปริญญ์ จินดาประเสริฐ และอุกฤษฏ์ ใจศรี (2548) ได้หล่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 40 ถึง 80 แล้วทดสอบความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบสามารถต้านทานการซึมผ่านได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม การเพิ่มปริมาณเถ้าลอยและเถ้าแกลบทำให้ความสามารถในการต้านทานดีขึ้น ส่วนความสามารถในการรับกำลังอัด คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 20 ที่อายุ 28 วัน จะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และที่อายุ 90 วัน กำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นกว่าคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้เนื่องจาก อิทธิพลของการเกื้อหนุนกัน (Synergic effect) ระหว่างวัสดุปอซโซลานทั้งสอง

มณเฑียร ทิพนวณิช และคณะ (2548) พบว่า คอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทางทะเลเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน มีความสามารถในการพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่อง ในทางกลับกัน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง และประเภทห้า เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าร้อยละ 20 ของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตควบคุมเริ่มมีปัญหาในเรื่องกำลังอัดที่มีค่าต่ำลง ซึ่งอาจส่งผลเสียต่อองค์อาคารที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

จากการศึกษาของ Chalee และคณะ (2006) เกี่ยวกับผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีต่อระยะหุ้มของคอนกรีตที่สัมผัสน้ำทะเล พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 35 หรือ 50 จะช่วยป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เป็นสนิมได้ดีกว่า คอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 สำหรับคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัด 30 เมกะปาสกาล ($W/B \text{ ratio} = 0.65$) สามารถลดระยะหุ้มขั้นต่ำที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเล จาก 50 มม. เหลือ 30 มม. เมื่อผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 50

Bai และคณะ (2003) ได้ทดลองหล่อคอนกรีต ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์, เถ้าถ่านหิน และดินขาวเผา (Metakaolin) เป็นวัสดุประสาน เพื่อศึกษาการซึมผ่านของคลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลสังเคราะห์เป็นเวลา 18 เดือน พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 30 ช่วยให้ความเข้มข้นและความสามารถในการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลง ซึ่งสามารถเห็นผลได้ชัดเจนขึ้นเมื่อระยะเวลาการแช่น้ำทะเลนานขึ้น

Thomas และ Matthews (2004) ได้ทำการเก็บข้อมูลคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี คอนกรีตดังกล่าวแช่น้ำทะเลอยู่ที่ Building Research Establishment (BRE) บริเวณปากแม่น้ำ Thames Estuary เมือง Shoeburyness ประเทศอังกฤษ มีปริมาณสารประกอบคลอไรด์และซัลเฟตใกล้เคียงกับน้ำทะเลในประเทศไทย แต่น้ำทะเล BRE มีอุณหภูมิ 10 °C ซึ่งมีความแตกต่างจากอุณหภูมิของน้ำทะเลในเขตพื้นที่ร้อนชื้นอย่างประเทศไทยโดยสิ้นเชิง ดังนั้น สภาวะการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเลต่อคอนกรีตย่อมมีความแตกต่างกันหลายประเด็น ซึ่งในเบื้องต้น Thomas รายงานว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินช่วยต้านทานปริมาณคลอไรด์ที่พยายามซึมเข้าในคอนกรีตได้ดีกว่า คอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน และการบ่มคอนกรีตให้นานขึ้น มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์เพียงเล็กน้อยเมื่อคอนกรีตนั้นแช่อยู่ในน้ำทะเลเป็นเวลานาน ขณะที่ผลกระทบของการเพิ่มกำลังอัดที่มีต่อการต้านทานคลอไรด์ มีอิทธิพลน้อยกว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในปฏิภาคส่วนผสม

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาทั้งหมด คณะผู้วิจัยมีแนวความคิดในการสร้างฐานข้อมูลการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลจริง ในเขตภูมิอากาศร้อนชื้น เพื่อใช้แก้ปัญหาความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ตามชายฝั่งทะเล โดยใช้วัสดุปอชโซลานที่มีอยู่ในประเทศเพิ่มความทนทานของคอนกรีต ดังนั้น เถ้าถ่านหินจึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสม และมีศักยภาพเพียงพอในการนำไปใช้งาน การพิจารณาแหล่งผลิต ความละเอียด และปริมาณเถ้าถ่านหินที่ใช้ผสมคอนกรีต จึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ทราบประสิทธิภาพของเถ้าถ่านหินในการต้านทานการกัดกร่อนจากน้ำทะเล นอกจากนี้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และระยะหุ้มคอนกรีต ยังคงเป็นปัจจัยที่ต้องพิจารณาควบคู่ไปด้วย เมื่อดำเนินการเก็บข้อมูลได้ครบถ้วนตามที่วางแผนไว้ จะทำให้มีข้อมูลในการเลือกใช้ส่วนผสมคอนกรีตและระยะหุ้มที่เหมาะสมกับสภาพการกัดกร่อนในประเทศไทย ตลอดจนเป็นข้อมูลในการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

บทที่ 3 วิธีการศึกษา

บทนี้จะกล่าวถึงระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งประกอบด้วย วัสดุและการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการศึกษา อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการทดสอบในแต่ละขั้นตอน ซึ่งแยกเป็นรายละเอียดดังนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง และประเภทห้า ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตาม มอก.15-2532
- เถ้าถ่านหิน ใช้เถ้าถ่านหินจาก บริษัท เนชั่นแนล เพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด (โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า เอ็น. พี. เอส.) อำเภอศรีมหาโพธิ จังหวัดปราจีนบุรี และเถ้าถ่านหินจาก โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
- หินปูนย่อย ขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 20 มม.
- ทรายแม่น้ำหยาบ
- น้ำประปา
- สารเคมีผสมเพิ่ม ใช้น้ำยาผสมคอนกรีตประเภทสารลดน้ำพิเศษ ชนิดซัลโฟเนตเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเซต
- เหล็กเส้นกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม.

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Universal testing machine) (ดูรูปที่ 3.1)
- เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ (Auto titration equipment) (ดูรูปที่ 3.2)
- เครื่องทดสอบการซึมน้ำผ่านคอนกรีต (ดูรูปที่ 3.3)
- เครื่องบดวัสดุ (Grinding machine) (ดูรูปที่ 3.4)
- เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคด้วยแรงลม (Air classifier) (ดูรูปที่ 3.5)
- แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม.
- แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 20 ซม. (ดูรูปที่ 3.6)
- แบบฝังเหล็กเส้นกลมลงในคอนกรีต (ดูรูปที่ 3.7)
- ชุดทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ หิน ทราย
- ชุดตะแกรงร่อนมาตรฐาน

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
- เครื่องชั่งน้ำหนัก
- ชุดทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต
- ตู้อบปรับอุณหภูมิได้



รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต



รูปที่ 3.2 เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบการซึมน้ำผ่านคอนกรีต



รูปที่ 3.4 เครื่องบดวัสดุ



รูปที่ 3.5 เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคด้วยแรงลม



รูปที่ 3.6 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 20 ซม.



รูปที่ 3.7 แบบฝังเหล็กเส้นกลมลงในคอนกรีต

3.3 วิธีการศึกษา

3.3.1 การเตรียมวัสดุทดสอบ

เถาถ่านหินจาก บริษัท เนชั่นแนล เพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด (โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า เอ็น. พี. เอส.) อำเภอศรีมหาโพธิ จังหวัดปราจีนบุรี นำมาปรับปรุงคุณภาพของเถาถ่านหินด้วยการบดละเอียดด้วยเครื่องบดวัสดุ (ดูรูปที่ 3.3) ให้มีน้ำหนักร้อยละ 325 ไม่เกินร้อยละ 5

เถาถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง นำเถาถ่านหินที่ได้จากโรงงานโดยตรง(O) และเถาถ่านหินที่ผ่านการคัดแยกขนาดด้วยเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคด้วยแรงลม (C) มาใช้ในการหล่อคอนกรีต

เหล็กเส้นกลม ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. นำมาตัดให้มีความยาวท่อนละประมาณ 50 มม.

3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของปูนซีเมนต์และเถาถ่านหิน

ทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทห้า เถาถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. และเถาถ่านหินแม่เมาะ โดยใช้ขวดทดลองมาตรฐาน Le Chatelier ตามมาตรฐาน ASTM C 188 ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับวัสดุนั้น โดยปริมาตรของวัสดุที่ทำการทดสอบหาได้จากการแทนที่ใน

น้ำมันก๊าด ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์หรือเถ้าถ่านหิน ทำให้ปูนซีเมนต์หรือเถ้าถ่านหินแข็งตัวมีปริมาตรเปลี่ยนไป

ทดสอบความละเอียดของเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. และเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (มีขนาดช่องเปิดเท่ากับ 45 ไมโครเมตร) ด้วยวิธี Wet Sieve Analysis ซึ่งทำโดยการชั่งน้ำหนักวัสดุก่อนนำไปร่อนผ่านตะแกรงโดยใช้น้ำ เมื่อนำไปอบให้แห้งจะได้ส่วนที่เหลือนบนตะแกรง ซึ่งเป็นน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325

ถ่ายภาพขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทห้า เถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. และเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope เพื่อศึกษา ลักษณะรูปร่างของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทห้า เถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. และเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

วิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำทะเลที่แช่ตัวอย่างคอนกรีต โดยการเก็บตัวอย่างน้ำทะเลมาทดสอบคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH), ปริมาณคลอไรด์และซัลเฟต

3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม

ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C 127 และ ASTM C 128 ตามลำดับ ซึ่งความถ่วงจำเพาะของมวล คือ อัตราส่วนของน้ำหนักมวลรวมในอากาศเทียบกับน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกัน และทำการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ เพื่อทราบถึงปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไปจนเต็มช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ของมวลรวม แต่ไม่รวมน้ำที่เกาะอยู่ผิวนอกของมวลรวม ซึ่งค่าทั้งสองจะนำไปใช้ในการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียด และขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM C 136

3.3.4 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

3.3.4.1 คอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน เอ็น. พี. เอส. ที่บดละเอียดจนมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมตามวิธีของสถาบันคอนกรีตอเมริกัน (ACI) ออกแบบให้คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งเป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว เป็นคอนกรีตควบคุม มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ด้วยเถ้านหินที่ผ่านการบดในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้มีคอนกรีตที่ทำการศึกษา 15 ส่วนผสม และควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. หากการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด จะใช้สารลดน้ำพิเศษช่วยในการเพิ่มความสามารถได้ ซึ่งอัตราส่วนผสมคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ทำการหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. เพื่อทดสอบกำลังอัดคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 39

ทำการหล่อคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 20 ซม. เพื่อฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ลงในคอนกรีตที่ตำแหน่งระยะหุ้ม 1.0, 2.0, 5.0 และ 7.5 ซม. ดังนั้น จึงได้เตรียมแบบสำหรับฝังเหล็กเส้นกลมลงในคอนกรีต 2 รูปแบบ โดยรูปแบบที่ 1 จะใช้ฝังเหล็กที่ระยะหุ้ม 1.0, 2.0 และ 5.0 ซม. แสดงดังรูปที่ 3.8 รูปแบบนี้จะใช้หล่อคอนกรีตที่จะทำการเก็บผลการทดลองในช่วงอายุประมาณ 6 เดือน ถึง 5 ปี ส่วนรูปแบบที่ 2 ใช้ฝังเหล็กที่ระยะหุ้ม 5.0 และ 7.5 ซม. แสดงดังรูปที่ 3.9 แบบฝังเหล็กรูปแบบนี้จะใช้หล่อคอนกรีตที่จะทำการเก็บข้อมูลในระยะยาวตั้งแต่ 5 ปีขึ้นไป ในการหล่อตัวอย่างคอนกรีตจะนำแบบเหล็กดังกล่าว ไปวางบนแบบหล่อ จากนั้นใช้เหล็กนาร่องเสียบเข้าไปในแบบฝังเหล็ก เพื่อเป็นการดันให้คอนกรีตเกิดช่องว่างสำหรับที่จะฝังเหล็ก แล้วจึงทำการหย่อนเหล็กเส้นกลมลงไปลงในคอนกรีต โดยให้เหล็กอยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของคอนกรีต ดังรูปที่ 3.10 คอนกรีตรูปลูกบาศก์นี้ใช้สำหรับการทดสอบการซึมผ่านของสารประกอบคลอไรด์ในคอนกรีต และทดสอบความเป็นสนิมที่เกิดขึ้นกับเหล็กที่ถูกฝังไว้ในคอนกรีต

หลังจากทำการถอดแบบคอนกรีตแล้วเสร็จ นำคอนกรีตที่ได้ไปบ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 27 วัน แล้วจึงนำไปแช่น้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี โดยคอนกรีตจะสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง ตามน้ำขึ้น-ลง ดังรูปที่ 3.11 ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตเมื่ออายุการแช่น้ำทะเล 180 และ 365 วัน เพื่อทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ทดสอบความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต และทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีต ในส่วนของคอนกรีตที่มีอายุการแช่น้ำทะเล 365 วัน จะทำการทดสอบการซึมน้ำผ่าน

คอนกรีตด้วย พร้อมทั้งทำการเก็บตัวอย่างน้ำทะเล เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณ คลอไรด์และซัลเฟต

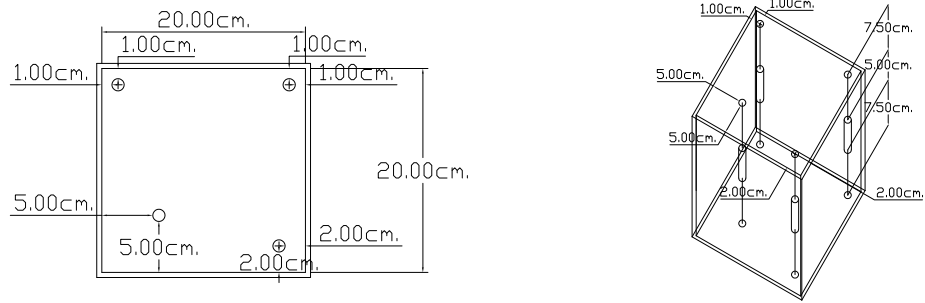
3.3.4.2 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะเป็นงานวิจัยที่ทำการเก็บผลทดสอบต่อเนื่องจากงานวิจัยที่เคยศึกษา ให้กับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งคอนกรีตในส่วนนี้ผ่านการแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 4 ปี

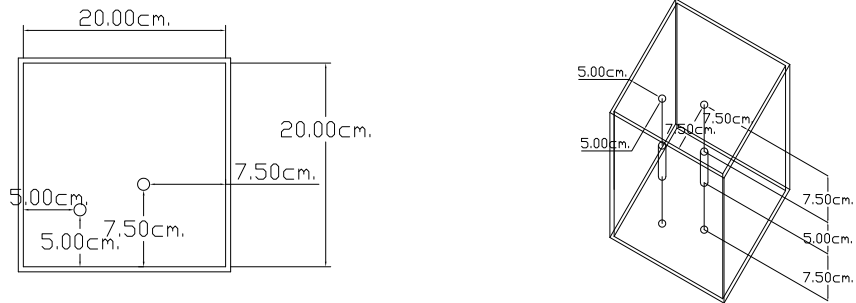
คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะมีวิธีการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมตามวิธีของสถาบันคอนกรีตอเมริกัน (ACI) ออกแบบให้คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งเป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว เป็นคอนกรีตควบคุม มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 และ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ด้วยเถ้าถ่านหินที่ได้จากโรงงานโดยตรง (O) ในอัตราส่วน ร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน รวมไปถึงใช้เถ้าถ่านหินที่ผ่านการคัดแยก ขนาดอนุภาค (C) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้มีคอนกรีตที่ทำการศึกษากว่า 27 ส่วนผสม อีกทั้งทำการหล่อ คอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทห้าเป็นวัสดุประสาน ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับคอนกรีตที่ใช้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ทำให้มีคอนกรีตที่ทำการศึกษาทั้งสิ้น 30 ส่วนผสม ซึ่ง อัตราส่วนผสมคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ทำการหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. และคอนกรีตรูปทรง ลูกบาศก์ขนาด 20 ซม. ดังเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินอื่น. พี. เอส. ทำการถอดแบบหล่อ คอนกรีตหลังจากหล่อคอนกรีต 24 ชั่วโมง และนำไปบ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 27 วัน แล้วจึงนำไปแช่ น้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี โดยคอนกรีตจะสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง ตามน้ำขึ้น-ลง ดังรูปที่ 3.11

หลังจากคอนกรีตแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 4 ปี ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีต เพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัด ของคอนกรีต ทดสอบความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต และทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ ในคอนกรีต เมื่อคอนกรีตมีอายุการแช่น้ำทะเลครบ 5 ปี ทำการเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบคุณสมบัติของ คอนกรีตดังกล่าวข้างต้น และทำการทดสอบการซึมน้ำผ่านคอนกรีตอีกด้วย



รูปที่ 3.8 แบบสำหรับฝังเหล็กลงในคอนกรีต รูปแบบที่ 1



รูปที่ 3.9 แบบสำหรับฝังเหล็กลงในคอนกรีต รูปแบบที่ 2

ตารางที่ 3.1 ปฏิภาณส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอน. พี. เอส. ที่บดละเอียด

Type of Concrete	Mix Proportion of Concrete (kg/m^3)						Slump (cm)
	Cement	Fly Ash	Coarse-Agg	Fine-Agg	Water	SP (%)	
I45CT	424	-	979	767	190	-	7
I45FN15	360	64	960	767	190	2.12 (0.50)	8
I45FN25	318	106	949	767	190	3.18 (0.75)	10
I45FN35	276	148	936	767	190	3.82 (0.90)	8
I45FN50	212	212	917	767	190	6.15 (1.45)	8
I55CT	348	-	1,015	799	191	-	8
I55FN15	296	52	1,001	799	191	1.04 (0.30)	10
I55FN25	261	87	990	799	191	1.74 (0.50)	9
I55FN35	226	122	976	799	191	2.44 (0.70)	9
I55FN50	174	174	963	799	191	3.83 (1.10)	8
I65CT	295	-	1,039	814	192	-	9
I65FN15	251	44	1,028	814	192	0.59 (0.20)	8
I65FN25	221	74	1,023	814	192	0.89 (0.30)	9
I65FN35	192	103	1,012	814	192	1.18 (0.40)	9
I65FN50	148	148	998	814	192	1.77 (0.60)	8

หมายเหตุ : คิดปริมาณน้ำที่อยู่ในสารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำพิเศษ เท่ากับ ร้อยละ 50 ของ น้ำหนัก

ตารางที่ 3.2 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

Type of Concrete	Mix Proportion of Concrete (kg/m^3)						Slump (cm)
	Cement	Original FA	Classified FA	Coarse-Agg	Fine-Agg	Water	
I45	478	-	-	639	1,024	215	15
V45	478	-	-	639	1,024	215	13
I45O15	406	72	-	639	1,004	215	18
I45O25	359	119	-	639	990	215	22
I45O35	311	167	-	639	977	215	23
I45O50	239	239	-	639	957	215	24
I45C15	406	-	72	639	1,004	215	21
I45C25	359	-	119	639	990	215	22
I45C35	311	-	167	639	977	215	24
I45C50	239	-	239	639	957	215	23
I55	478	-	-	639	971	262	22
V55	478	-	-	639	971	262	22
I55O15	406	72	-	639	948	262	23
I55O25	359	119	-	639	933	262	25
I55O35	311	167	-	639	918	262	23
I55O50	239	239	-	639	897	262	22
I55C15	406	-	72	639	948	262	22
I55C25	359	-	119	639	933	262	22
I55C35	311	-	167	639	918	262	23
I55C50	239	-	239	639	897	262	23
I65	478	-	-	639	922	311	25
V65	478	-	-	639	922	311	24
I65O15	406	72	-	639	898	311	21
I65O25	359	119	-	639	881	311	21
I65O35	311	167	-	639	864	311	22
I65O50	239	239	-	639	840	311	22
I65C15	406	-	72	639	898	311	22
I65C25	359	-	119	639	881	311	23
I65C35	311	-	167	639	864	311	23
I65C50	239	-	239	639	840	311	25



(ก) วางแบบฝังเหล็กบนแบบหล่อคอนกรีต



(ข) ใช้เหล็กนำร่องเพื่อดันคอนกรีตให้เกิดช่องว่าง



(ค) หย่อนเหล็กลงในคอนกรีต



(ง) ตรวจสอบว่าเหล็กที่ฝังอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ



(จ) ใช้เกรียงเกลี่ยคอนกรีตสดให้เต็มแบบหล่อ



(ฉ) ตกแต่งผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ

รูปที่ 3.10 การฝังเหล็กลงในคอนกรีต



(ก) คอนกรีตในสภาพแห้ง



(ข) คอนกรีตในสภาพเปียก

รูปที่ 3.11 สถานที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา

3.3.5 การทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยในหัวข้อนี้คือ การศึกษาความสามารถในการซึมผ่านของคลอไรด์ ที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิวหน้าคอนกรีต ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆ เป็นตัวบ่งชี้ถึงความรุนแรงของการกัดกร่อนเหล็กที่ฝังในคอนกรีต นอกจากนี้เมื่อนำปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆ ไปเปรียบเทียบกับระยะเวลาการแช่คอนกรีตในน้ำทะเล ทำให้เห็นศักยภาพการใช้ถ้ำถ่านหินเพื่อเพิ่มความทนทานของคอนกรีต และต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเล

การทดสอบใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 20 ซม. ที่ผ่านการแช่น้ำทะเลตามระยะเวลาที่กำหนด โดยนำคอนกรีตมาทำการเจาะบริเวณกึ่งกลางของก้อนตัวอย่าง ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7.5 ซม. (ดังแสดงในรูปที่ 3.12) ทำการปาดผิวหน้าของแท่งคอนกรีตที่ได้จากการเจาะประมาณ 1 มม. เพื่อลดความแปรปรวนของปริมาณคลอไรด์ที่อยู่บริเวณผิวหน้าคอนกรีต จากนั้นทำการตัดแท่งคอนกรีตตามขวางให้มีความหนา 1 ซม. จำนวน 3 ชิ้น หรือมากกว่านั้น โดยพิจารณาตามระยะเวลาที่คอนกรีตแช่อยู่ในน้ำทะเล นำตัวอย่างคอนกรีตที่ได้มาทำการบดจนเป็นผง และร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20 (ขนาดช่องเปิด 850 ไมโครเมตร) นำผงคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ ไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 114 และ C 1152 โดยการไทเทรตปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีต ด้วยเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ (ขั้นตอนตามรูปที่ 3.13) ซึ่งสามารถคำนวณร้อยละของคลอไรด์ได้ ดังสมการที่ 3.1

$$Cl, \% = \frac{3.545[(V_1 - V_2)N]}{W} \quad (3.1)$$

เมื่อ	V_1	คือ	Millilitres ของสารละลาย 0.05 N AgNO ₃ ที่ใช้สำหรับการไทเทรตตัวอย่าง
	V_2	คือ	Millilitres ของสารละลาย 0.05 N AgNO ₃ ที่ใช้สำหรับการไทเทรต Blank
	N	คือ	Exact normality ของสารละลาย 0.05 N AgNO ₃
	0.10	คือ	Milliequivalents ของ NaCl ที่เติม (2.0 mL × 0.05 N)
	W	คือ	น้ำหนักของผงตัวอย่างคอนกรีต (กรัม)



รูปที่ 3.12 คอนกรีตที่ได้จากการเจาะ

3.3.6 การทดสอบความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

การสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ที่ระยะหุ้มต่างๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเชิงโยงความสัมพันธ์กับปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีต และเพื่อศึกษาความเหมาะสมในการเลือกใช้ระยะหุ้มคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เพื่อดำเนินงานการกักกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทางทะเล

หลังจากเก็บตัวอย่างคอนกรีต ที่มีอายุการแช่น้ำทะเลครบตามกำหนด นำคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์มาทำการกดให้แตก เพื่อเก็บเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้มต่างๆ มาสำรวจความเป็นสนิม ตามวิธีต่อไปนี้

3.3.6.1 การวัดพื้นที่การเกิดสนิม

การวัดพื้นที่การเกิดสนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ใช้กระดาษกราฟใสที่มีช่องตาราง ขนาด 1×1 มม. ตัดให้มีขนาดใหญ่พอที่จะสามารถหาได้รอบแท่งเหล็ก จากนั้นใช้ปากกาเขียนแผ่นใสระบายบนกระดาษกราฟใสตรงตำแหน่งที่เกิดสนิม นำกระดาษกราฟใสที่ได้มานับพื้นที่การเกิดสนิม เทียบกับพื้นที่ผิวแท่งเหล็กทั้งหมด แล้วนำมาคำนวณร้อยละของพื้นที่ผิวของเหล็กที่เกิดสนิม ดังสมการที่ 3.2

$$C, \% = \left(\frac{RA}{SA} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

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



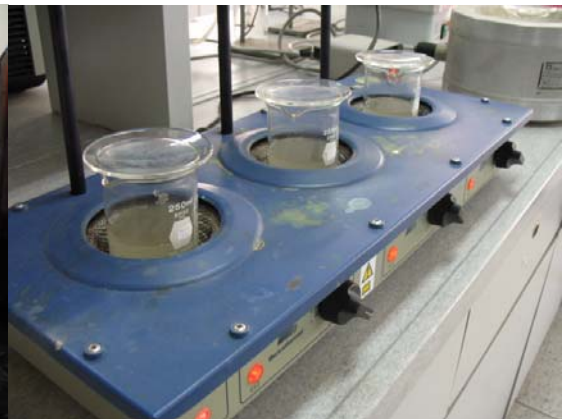
(ก) ชั่งน้ำหนักผงคอนกรีต



(ข) เติมน้ำกลั่น 75 มล.



(ค) เติมสารละลายกรดไนตริก 25 มล.



(ง) ให้ความร้อน



(จ) กรองสารละลายตัวอย่าง



(ฉ) ไตเตรทด้วยเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ

รูปที่ 3.13 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

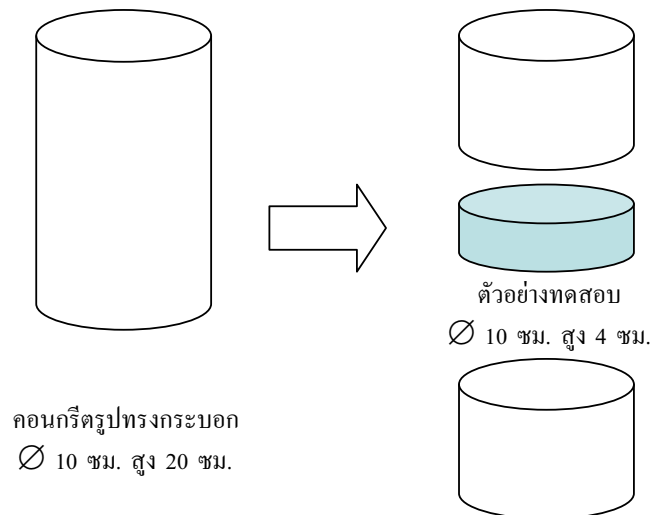
3.3.7 การทดสอบการซึมน้ำผ่านคอนกรีต

เนื่องจากคอนกรีตไม่ได้เป็นวัสดุทึบน้ำ แต่เป็นวัสดุที่น้ำซึมผ่านได้ค่อนข้างช้า จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมการซึมน้ำผ่านคอนกรีต โดยมุ่งเน้นการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำผ่านคอนกรีต ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำผ่านคอนกรีตเป็นดัชนีบ่งชี้ถึงความคงทนของคอนกรีต ในด้านการต้านทานการซึมผ่านของของเหลวเข้าสู่คอนกรีต โดยของเหลวดังกล่าวอาจเป็นตัวกลางที่นำพาสารเคมีเข้ามาทำอันตรายต่อคอนกรีต หรือเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีต เมื่อสารละลายไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ หรือซึมผ่านได้ช้าลง นั่นคือ คอนกรีตสามารถต้านทานการกร่อนจากสารเคมีต่างๆ ได้ดีขึ้น ช่วยให้คอนกรีตมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมบำรุงรักษา ตลอดจนเกิดความคุ้มค่าสูงสุดในการใช้งานโครงสร้างดังกล่าว

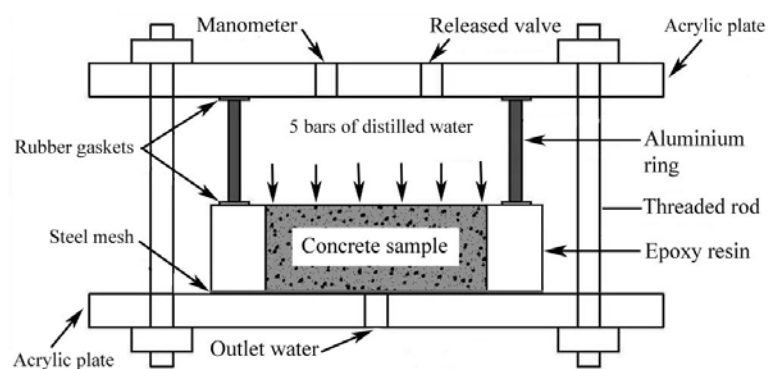
การทดสอบใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ที่ผ่านการแช่น้ำทะเลตามระยะเวลาที่กำหนด โดยนำคอนกรีตมาตัดตามขวางที่ตำแหน่งกึ่งกลางของก้อนตัวอย่าง ให้มีความสูง 4 ซม. ดังรูปที่ 3.14 สาเหตุที่ใช้ตัวอย่างคอนกรีตที่กึ่งกลาง เพราะส่วนบนของคอนกรีตอาจมีผลกระทบของการเอิ่มน้ำ สำหรับส่วนล่างอาจมีปริมาณมวลรวมหยาบมากเกินไป เนื่องจากผลของการกระทุ้งให้แน่น ทำการขัดผิวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบโดยรอบ และทำความสะอาดตัวอย่างให้ปราศจากฝุ่นผง เพื่อให้สามารถยึดติดกับอีพอกซีได้ดี และป้องกันฝุ่นละอองเข้าไปอุดตันการไหลของน้ำในคอนกรีต ทำให้ผิวตัวอย่างแห้งโดยนำไปตากแดดประมาณ 2-3 ชั่วโมง จากนั้นทำการหล่ออีพอกซีล้อมรอบบริเวณด้านข้างของก้อนตัวอย่าง ให้มีความสูงเท่ากับก้อนตัวอย่าง เพื่อป้องกันการซึมผ่านน้ำทางด้านข้างของคอนกรีตที่จะทดสอบ และเพื่อให้เกิดการไหลของน้ำในตัวอย่างคอนกรีตในทิศทางเดียวจากบนลงสู่ด้านล่าง โดยก้อนตัวอย่างต้องอยู่ตำแหน่งตรงกลางของแบบหล่อ รวมทั้งต้องระวังไม่ให้อีพอกซีสัมผัสกับผิวบนและล่างของก้อนตัวอย่างเนื่องจากจะมีผลกระทบต่อการทดสอบ ทำการป้องกันโดยการใช้กระดาษกาวปิดที่ผิวทั้งสองด้านของก้อนตัวอย่างให้สนิทและไม่มีฟองอากาศ หลังจากทำการหล่ออีพอกซีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงทำการแกะแบบ และปล่อยให้อีพอกซีแข็งตัวเป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้สามารถรับกำลังได้ จึงนำก้อนตัวอย่างที่หล่ออีพอกซีแล้วมาประกอบกับชุดทดสอบ ดังรูปที่ 3.15 แล้วจึงนำไปประกอบกับเครื่องทดสอบการซึมน้ำผ่านคอนกรีต (ดูรูปที่ 3.3) ซึ่งก่อนที่จะประกอบชุดเข้ากับเครื่องทดสอบต้องทำการไล่อากาศออกจากชุดทดสอบก่อน จากนั้นทำการอัดน้ำที่ความดัน 0.5 เมกะปาสกาล ให้ไหลผ่านคอนกรีต บันทึกปริมาณน้ำที่ไหลผ่านกับเวลา จนกระทั่งอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวอย่างมีค่าคงที่ นำค่าอัตราการไหลไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำผ่านคอนกรีต ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการใช้สมการของความต่อเนื่องและทฤษฎีการไหลของคาร์ซี ดังสมการที่ 3.3

$$K = \frac{\rho L g Q}{P A} \quad (3.3)$$

เมื่อ	K	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำผ่านคอนกรีต (m/s)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
	L	คือ	ความหนาหรือความสูงของก้อนตัวอย่าง (m)
	g	คือ	แรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)
	Q	คือ	อัตราการไหลแบบคงที่ (m^3/s)
	P	คือ	แรงดันน้ำที่ไหลผ่านก้อนตัวอย่างคอนกรีต ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{sec}^2)/(\text{m}^2)$
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง (m^2)



รูปที่ 3.14 การตัดตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการซึมน้ำผ่านคอนกรีต



รูปที่ 3.15 ชุดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำผ่านคอนกรีต

3.3.8 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

เนื่องจากตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แบ่งออกเป็นหลายประเภท ดังนั้นจึงได้กำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษาในแต่ละประเภทเพื่อความชัดเจน ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สัญลักษณ์ของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

สัญลักษณ์	ความหมาย
I	คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งเป็นวัสดุประสาน
V	คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทห้าเป็นวัสดุประสาน
CT	คอนกรีตควบคุม ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว
FN	เถาถ่านหินเอ็น. พี. เอส. ที่บดละเอียดจนมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 (เท่ากับ ร้อยละ 2.0)
O	เถาถ่านหินแม่เมาะที่ได้จากโรงงานโดยตรง
C	เถาถ่านหินแม่เมาะที่ผ่านการคัดแยกขนาดอนุภาค
45, 55, 65	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ
15, 25, 35, 50	คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถาถ่านหิน ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

รูปแบบสัญลักษณ์ของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ I/A/FA/B โดย A เป็นส่วนที่ใช้บอกถึงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และ B เป็นส่วนที่แสดงถึงอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถาถ่านหิน ยกตัวอย่างเช่น

สัญลักษณ์ I45FN15 หมายถึง คอนกรีตที่ใช้เถาถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. บดละเอียด แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ในอัตราส่วนร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

สัญลักษณ์ I65O50 หมายถึง คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ใช้เถาถ่านหินแม่เมาะที่ได้จากโรงงานโดยตรงแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

สัญลักษณ์ V55 หมายถึง คอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทห้าเป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีต คุณสมบัติของน้ำทะเลที่นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ ตลอดจนการวิเคราะห์ผลการทดสอบคอนกรีตหลังจากแช่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็ยกสลับแห่ง ในด้านกำลังรับแรงอัด, การซึมผ่านของคลอไรด์, การสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังอยู่ในคอนกรีต และการซึมน้ำผ่านคอนกรีต

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ และเถ้าถ่านหิน เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตโดยตรง เช่น ความสามารถในการเท ความต้องการน้ำ กำลังอัด และความทนทานของคอนกรีต เป็นต้น

4.1.1.1 ลักษณะทั่วไปและสีของวัสดุ

ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าถ่านหินมีลักษณะเป็นผงละเอียดคล้ายแป้งฝุ่น เมื่อสัมผัสรู้สึกว่เถ้าถ่านหินมีเนื้อเนียนละเอียด ส่วนของปูนซีเมนต์ค่อนข้างหยาบกว่า จากรูปที่ 4.1 พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งมีสีเทาอ่อน ซึ่งเกิดจากออกไซด์ของเหล็ก โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทห่ามีสีเทาเข้มกว่าเล็กน้อยเนื่องจากปริมาณออกไซด์ของเหล็กที่มากกว่า (Lea, 1970) ส่วนเถ้าถ่านหินที่ได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า เอ็น.พี.เอส. โดยตรง (FN-O) มีสีเทาเข้มปนน้ำตาลอ่อน และเมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพโดยการบด(FN-F) ให้มีความละเอียดสูงขึ้น มีสีเทาดำ เถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ได้โดยตรงจากโรงงาน(FM-O) มีสีน้ำตาลแก่ปนเทา เมื่อทำการคัดแยกขนาดด้วยแรงลม(FM-F) จะมีสีอ่อนลง

4.1.1.2 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

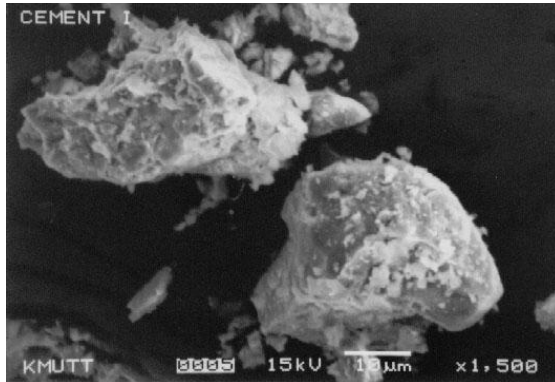
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งและเถ้าถ่านหินซึ่งมีลักษณะเป็นฝุ่นผงขนาดเล็ก เมื่อนำมาตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง และประเภทห่า มีลักษณะรูปร่างคล้ายกัน คือ เป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ รูปร่างไม่แน่นอน และอนุภาคจะมีหลายขนาดปะปนกัน ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3

เถาถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. มีลักษณะอนุภาคดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 คือ มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม และมีความพรุนค่อนข้างสูง เนื่องจากในกระบวนการเผาถ่านหินใช้เตาเผาแบบ FBC (Fluidized Bed Combustion) ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้เผาค่อนข้างต่ำ คือ ประมาณ 800-900 °C ทำให้ถ่านหินที่ได้ออกมามีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอนและมีความพรุนสูง (สุรพล พฤษานุกูล, 2546) เถาถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการบด ยังคงมีลักษณะเช่นเดียวกับก่อนทำการบด เพียงแต่มีขนาดอนุภาคที่เล็กลงเท่านั้น

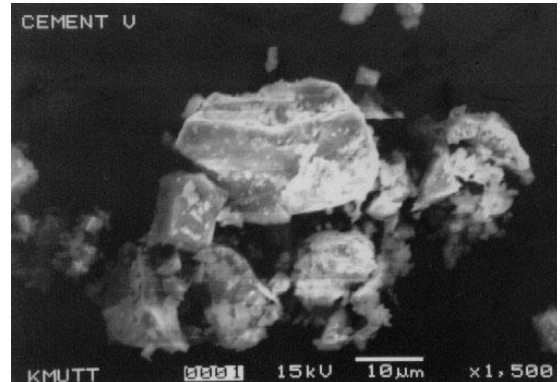
รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงเถาถ่านหินแม่เมาะที่ได้โดยตรงจากโรงงาน และผ่านการคัดแยกขนาดอนุภาคด้วยแรงลม ตามลำดับ อนุภาคมีลักษณะทรงกลมตัน ผิวเรียบ มีขนาดเล็กและใหญ่กระจายอยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากเป็นการเผาถ่านหินด้วยเตาแบบ PCC (Pulverized Coal Combustion) ซึ่งใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,100 °C ในการเผาไหม้ ทำให้เถาถ่านหินเกิดการหลอมเหลวจนเป็นทรงกลมตัน และขนาดอนุภาคของเถาถ่านหินจะมีขนาดเล็กลงตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้นจากการคัดแยกขนาดอนุภาคด้วยแรงลม



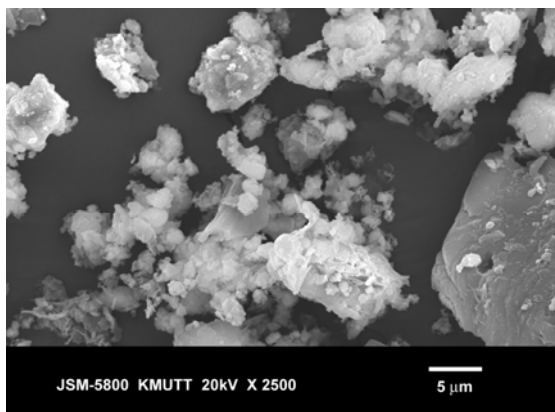
รูปที่ 4.1 ลักษณะทั่วไปและสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทห้า, เถาถ่านหินที่ได้จากโรงไฟฟ้า เอ็น.พี.เอส. โดยตรง (FN-O), เถาถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ที่ผ่านการบดละเอียด (FN-F), เถาถ่านหินที่ได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะโดยตรง (FM-O) และเถาถ่านหินแม่เมาะที่ผ่านการคัดแยกขนาดอนุภาคด้วยแรงลม (FM-F)



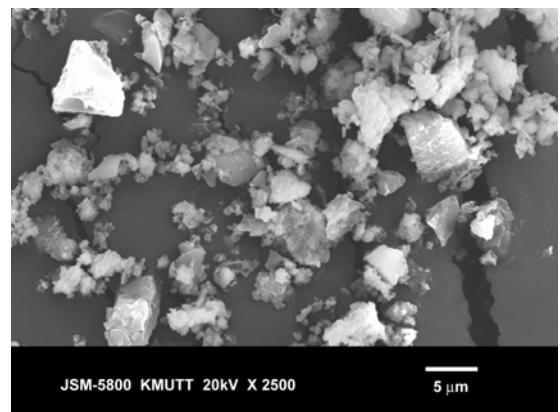
รูปที่ 4.2 ภาพขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์
ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง



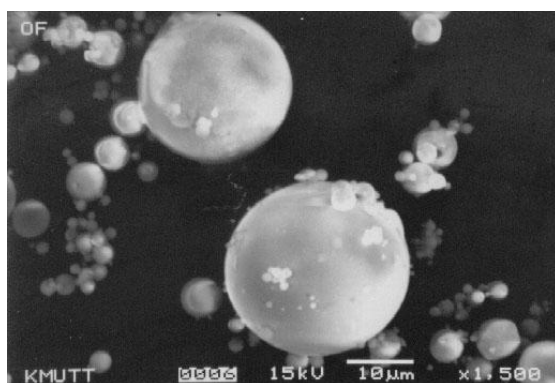
รูปที่ 4.3 ภาพขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์
ปอร์ตแลนด์ประเภทห้า



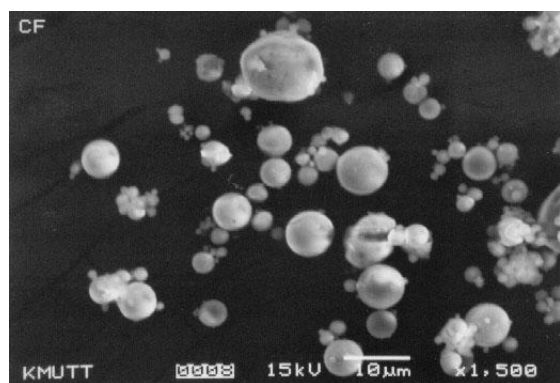
รูปที่ 4.4 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหิน
เอ็น.พี.เอส. ที่ได้จากโรงงาน
โดยตรง (FN-O)



รูปที่ 4.5 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหิน
เอ็น.พี.เอส. ที่ผ่านการบดละเอียด
(FN-F)



รูปที่ 4.6 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหิน
แม่เมาะ ที่ได้จากโรงงานโดยตรง
(FM-O)



รูปที่ 4.7 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหิน
แม่เมาะ ที่ผ่านการคัดแยกขนาด
อนุภาค (FM-F)

4.1.1.3 ความถ่วงจำเพาะ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง และประเภทห้า มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.13 และ 3.17 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ปกติของปูนซีเมนต์ คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 (Lea, 1970) การปรับปรุงความละเอียดของเถ้าถ่านหินเอ็น. พี. เอส. โดยการบดทำให้ความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เถ้าถ่านหินก่อนการบด FN-O มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.30 หลังจากทำการบดเถ้าถ่านหิน FN-F มีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็น 2.35 ทั้งนี้เนื่องจากการบดทำให้อนุภาคของเถ้าถ่านหินที่มีความพรุนอยู่ภายในแตกออก ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น เถ้าถ่านหินแม่เมาะ FM-O และ FM-F มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.22 และ 2.38 ตามลำดับ เถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยแรงลม มีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นตามความละเอียด เนื่องจากอนุภาคของเถ้าถ่านหินที่มีลักษณะทรงกลมตัน ช่วยให้การคัดแยกขนาดด้วยแรงลมเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และได้เถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กลงกว่าเดิม จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่า ความถ่วงจำเพาะแปรผันโดยตรงกับความละเอียด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ณรงค์ชัย วิวัฒนาช่าง และคณะ, 2542; เรืองรุชดี ชีระโรจน์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2543; ไกรวุฒิ เกียรติโกมล และคณะ, 2539)

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

Sample	Specific Gravity	Retained on a Sieve No.325 (%)
Cement Type I	3.13	N/A
Cement Type V	3.17	N/A
FN-O	2.30	40
FN-F	2.35	2
FM-O	2.22	37
FM-F	2.38	8

Remark: N/A = Not applied

4.1.1.4 ความละเอียด

เมื่อพิจารณาความละเอียดของวัสดุโดยการหาปริมาณอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) พบว่า เถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. FN-O มีค่าเท่ากับร้อยละ 40 ซึ่งสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดไว้ ส่วนเถ้าถ่านหิน FN-F มีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงลดลงจาก FN-O คือ มีค่าเท่ากับร้อยละ 2 สำหรับเถ้าถ่านหินแม่เมาะ FM-O และ FM-F มีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 37 และ 8 ตามลำดับ เห็นได้ว่าปริมาณอนุภาคของเถ้าถ่าน

หิน FM-O ที่ค้ำบนตระแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดไว้ คือ ไม่เกินร้อยละ 34 การปรับปรุงคุณภาพของเถ้าถ่านหินด้วยวิธีการบด หรือการคัดแยกขนาดอนุภาค ด้วยแรงลม ช่วยให้เถ้าถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะที่เพิ่มขึ้น และสามารถลดขนาดอนุภาคให้เล็กลงได้

4.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectroscopy และวิธี Wet Analysis พบว่า ค่าออกไซด์ต่างๆ ของปูนซีเมนต์ทั้งสองประเภทมีค่าใกล้เคียงกัน โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง และประเภทห้า มีผลรวมของออกไซด์หลัก แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกา (SiO₂), อลูมินา (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) เท่ากับร้อยละ 94.43 และ 96.29 ตามลำดับ มาตรฐาน ASTM C 150 กำหนดว่า MgO ต้องไม่เกินร้อยละ 3.5, SO₃ ต้องไม่เกินร้อยละ 3.5 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง และไม่เกินร้อยละ 2.3 ในปูนซีเมนต์ประเภทห้า และค่า LOI ต้องไม่เกินร้อยละ 3 ซึ่งพบว่า ปูนซีเมนต์ทั้งสองประเภทมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดทั้งหมด

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทห้า มีปริมาณ C₃A ต่ำมาก คือเท่ากับร้อยละ 1.80 ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐาน ASTM C 150 กำหนดคือต้องไม่เกินร้อยละ 5 ทั้งนี้เพื่อต้องการจำกัดปริมาณ C₃A ที่จะไปทำปฏิกิริยากับเกลือซัลเฟต ทำให้คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทห้าสามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้ดี แต่การใช้ปูนซีเมนต์ประเภทห้ามีข้อด้อยในเรื่องการป้องกันการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตเนื่องจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ โดย Rasheeduzzafar (1991) พบว่า เหล็กเสริมภายในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทห้า ถูกกัดกร่อนจากคลอไรด์มากกว่าและเร็วกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. FN-O และ FN-F ตามตารางที่ 4.2 พบว่า ผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ มีค่าเท่ากับร้อยละ 60.62 และ 65.46 ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณของออกไซด์ดังกล่าวระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก มีปริมาณ SO₃ ไม่เกินร้อยละ 5 แต่ค่า LOI มีค่าสูงกว่าร้อยละ 6 ค่อนข้างมาก (มี LOI ประมาณร้อยละ 25) จึงไม่อาจจัดเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. อยู่ใน Class C ได้ตามหลักการของการจำแนกตามองค์ประกอบทางเคมี แต่เพื่อความชัดเจนในการนำเถ้าถ่านหินเอ็น. พี. เอส. ไปใช้งานในงานคอนกรีต จำเป็นต้องศึกษาถึงผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด ความทนทาน การซึมผ่านน้ำ ฯลฯ ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินดังกล่าวด้วย

เถ้าถ่านหินแม่เมาะ FM-O และ FM-F มีผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับ 78.65 และ 78.47 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก สามารถจัดเถ้าถ่านหินแม่เมาะอยู่ใน Class F ได้ และ

เถ้านหินทั้งสองชนิดมีปริมาณ SO_3 ไม่นเกินร้อยละ 5 และค่า LOI ไม่นเกินร้อยละ 6 ตามที่มาตรฐาน ASTM C 618 กำหนด

เมื่อพิจารณาโดยภาพรวม พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหิน FN-O มีค่าใกล้เคียงกับเถ้านหิน FN-F และเถ้านหิน FM-O มีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับเถ้านหิน FM-F ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Mora และคณะ (1993) และ สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ (2538) ที่พบว่า การคัดแยกขนาดเถ้านหินไม่ทำให้องค์ประกอบทางเคมีเปลี่ยนแปลงไปมากนัก

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

Chemical Composition	Cement I	Cement V	FN-O	FN-F	FM-O	FM-F
Silicon Dioxide, SiO_2 (%)	20.80	21.52	46.08	46.70	44.95	44.57
Aluminum Oxide, Al_2O_3 (%)	5.50	3.56	12.50	12.85	23.70	23.5
Iron Oxide, Fe_2O_3 (%)	3.16	4.51	2.04	5.91	10.80	10.4
Calcium Oxide, CaO (%)	64.97	66.70	3.75	4.17	13.80	13.84
Magnesium Oxide, MgO (%)	1.06	1.20	N/A	N/A	3.47	3.29
Sodium Oxide, Na_2O (%)	0.08	0.10	0.08	0.14	0.07	0.08
Potassium Oxide, K_2O (%)	0.55	0.24	0.88	1.07	2.38	2.59
Sulfur Trioxide, SO_3 (%)	2.96	2.11	0.82	0.77	1.31	1.24
Loss on Ignition, LOI (%)	2.89	1.74	26.63	25.06	0.52	0.76
Tricalcium Silicate, C_3S (%)	56.50	71.60	-	-	-	-
Dicalcium Silicate, C_2S (%)	17.01	7.68	-	-	-	-
Tricalcium Aluminate, C_3A (%)	9.23	1.80	-	-	-	-
Tetracalcium Aluminoferrite, C_4AF (%)	9.62	13.72	-	-	-	-

Remark: N/A = Not applied

4.2 คุณสมบัติของมวลรวม

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบและละเอียด ที่ใช้ปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน เอ็น. พี. เอส. และคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินแม่เมาะ แสดงผลดังตารางที่

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. และ
คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

Determination	NPS fly ash		Mae Moh fly ash	
	Coarse Agg.	Fine Agg.	Coarse Agg.	Fine Agg.
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.72	2.61	2.77	2.57
Apparent Specific Gravity	2.74	2.65	2.80	2.61
Absorption (%)	0.43	0.90	0.64	0.96
Fineness Modulus	N/A	2.95	6.66	2.63
Maximum Size (mm)	20	N/A	19	N/A

Remark: N/A = Not applied

4.3 คุณสมบัติของน้ำทะเล

จากการเก็บตัวอย่างน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา ในแต่ละช่วงเวลาที่คอนกรีตแช่อยู่ในน้ำทะเล ดังตารางที่ 4.4 พบว่า น้ำทะเลมีลักษณะใส ไม่มีสี มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.8 ถึง 8.2 ซึ่งมีความเป็นด่างอ่อนๆ ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของสถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล (2537) ที่รายงานว่า บริเวณชายฝั่งทะเลศรีราชามีค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 7.86 ถึง 8.63 ส่วนสารประกอบที่ปะปนในน้ำทะเล จะเห็นได้ว่า มีค่าอยู่ในระดับใกล้เคียงกับทะเลทั่วไป (Thomas และ Matthews, 2004) นั่นคือ ปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000 ถึง 19,000 มก./ล. และปริมาณซัลเฟตมีค่า 2,200 ถึง 2,700 มก./ล. จากการทดสอบพบว่าปริมาณคลอไรด์มากกว่าซัลเฟต ประมาณ 8 เท่า โดยปริมาณคลอไรด์ที่มีในน้ำทะเลส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบโซเดียมคลอไรด์ประมาณร้อยละ 90 และอีกประมาณร้อยละ 10 เป็นสารประกอบแมกนีเซียมคลอไรด์ จากข้อกำหนดของ ACI 318-05 ที่ระบุว่า คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำที่มีซัลเฟตละลายอยู่ในปริมาณ 1,500 ถึง 10,000 มก./ล. ถือว่าคอนกรีตอยู่ในสถานะที่อาจเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตอย่างรุนแรง นั่นคือ น้ำทะเลบริเวณด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา มีผลกระทบต่อคอนกรีตในขั้นรุนแรง ACI จึงแนะนำให้ใช้คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 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 2 รอบภายใน 1 วัน คือ มีระดับสูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตในช่วงเวลาเช้า จากนั้นระดับน้ำเริ่มลดลงในช่วงเวลาบ่ายจนคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง ช่วงเย็นระดับน้ำเริ่มเพิ่มสูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตอีกครั้ง และลดระดับลงในเวลากลางคืน ซึ่งในแต่ละฤดูกาล เวล่าน้ำขึ้น-ลง อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปบ้าง เช่น ช่วงฤดูหนาว ระดับน้ำที่สูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตจะมีระยะเวลายาวนานกว่าปกติ และลดระดับลงเพียงเล็กน้อย ทำให้บางครั้งคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งในช่วงเวลาสั้นมาก หรือไม่ได้อยู่ในสภาพแห้งเลย

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของน้ำทะเล

Time	Parameter			
	Sample Condition	pH	Chloride, Cl ⁻ (mg/L)	Sulphate, SO ₄ ²⁻ (mg/L)
2001 January	Clear, No Color	8.2	18,033	2,242
2001 October	Clear, No Color	7.9	17,125	2,230
2002 May	Clear, No Color	8.2	16,210	2,500
2002 September	Clear, No Color	7.8	17,612	2,478
2003 August	Clear, No Color	7.9	17,125	2,230
2003 December	Clear, No Color	8.2	18,820	2,680
2004 April	Clear, No Color	8.2	16,210	2,500
2005 February	Clear, No Color	8.2	18,035	2,240

4.4 สภาพผิวหน้าคอนกรีตเมื่อแช่ในน้ำทะเล

4.4.1 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ที่บดละเอียดจนมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 2.0

ภายหลังจากการเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 6 และ 12 เดือน พบว่า คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 6 เดือน มีสีใกล้เคียงกับสภาพคอนกรีตก่อนแช่น้ำทะเล มีเพียงคราบเกลือติดอยู่ที่ผิวหน้าเล็กน้อย และยังไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของสารเคมี สภาพโดยรวมของคอนกรีตค่อนข้างสมบูรณ์ ส่วนคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลครบ 12 เดือน สีของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. เริ่มเปลี่ยนจากสีดำเข้มในตอนต้น เป็นสีดำออกเหลืองเขียว แต่ไม่พบคราบสนิมและรอยแตกร้าวที่ผิวหน้าคอนกรีต อย่างไรก็ตามพบว่า เริ่มเกิดการสึกกร่อนที่ผิวหน้าเนื่องจากแรงกระทำของคลื่นคอนกรีตบางก้อนพบรอยเพรียง และตะไคร่น้ำติดอยู่ตามผิวคอนกรีต



(ก) สีคอนกรีต และสภาพการสึกกร่อนเนื่องจากแรงกระแทกของคลื่น



(ข) เพรียง และตะไคร่น้ำที่ติดอยู่ตามผิวคอนกรีต

รูปที่ 4.8 สภาพผิวคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส.
ที่ผ่านการแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 365 วัน

4.4.2 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะซึ่งแช่อยู่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 4 และ 5 ปี มีสภาพการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเลอย่างชัดเจน ผิวหน้าคอนกรีตเกิดการสึกกร่อนจากแรงกระแทกของคลื่น กรวด ทราย รวมไปถึงการกัดกร่อนทางเคมี จนสามารถสังเกตเห็นเม็ดทรายและหินได้อย่างชัดเจน ขณะที่ดำเนินการเก็บตัวอย่าง พบตัวอย่างคอนกรีตกระจายไปทั่วบริเวณชายหาด ขอบและมุมของ

คอนกรีตมีรอยแตกเล็กน้อย สีของคอนกรีตมีสีเหลืองคล้ำอมน้ำตาล และที่สำคัญมีคราบสนิมเกิดขึ้นที่ผิวคอนกรีตบริเวณรอยแตกร้าวตามแนวเหล็กที่ฝังอยู่ภายใน ซึ่งเกิดจากสนิมดันคอนกรีตรอบแท่งเหล็กให้ขยายตัวออก โดยคราบสนิมที่ซึมออกมาภายนอกตามรอยแตกนี้เกิดขึ้นในตำแหน่งที่มีระยะหุ้มน้อย (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่หัวข้อ 4.7)



รูปที่ 4.9 สภาพผิวคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ผ่านการแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

4.5 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

หลังจากเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่มีอายุการแช่น้ำทะเลครบกำหนดการทดสอบ นำคอนกรีตนั้นตากลมให้แห้งเป็นเวลา 1 วัน และทำการเคลือบหัว (Capping) คอนกรีตด้วยกัมมะถัน ซึ่งต้องทิ้งให้กัมมะถันที่เคลือบคอนกรีตแห้งตัวไม่ต่ำกว่า 2 ชั่วโมงจึงทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

4.5.1 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ที่บดละเอียดจนมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 2.0

ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ที่อายุ 28 วัน ก่อนนำไปแช่น้ำทะเล และทำการทดสอบคอนกรีตที่ผ่านการแช่น้ำทะเลจนมีอายุครบ 180 และ 365 วัน รวมไปถึงทดสอบคอนกรีตอายุ 365 วัน ซึ่งบ่มในน้ำประปาเพื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล มีผลการทดสอบดังตารางที่ 4.5

4.5.1.1 กำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำประปา

จากตารางที่ 4.5 พบว่า ที่อายุ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตควบคุม I45CT, I55CT และ I65CT มีค่าเท่ากับ 451, 395 และ 309 กก./ซม.² ตามลำดับ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง จะมีค่ากำลังอัดต่ำลง ซึ่งเป็นแนวโน้มที่ชัดเจนตามหลักความรู้เกี่ยวกับคอนกรีตโดยทั่วไป เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 พบว่า คอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินไม่เกินร้อยละ 25 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน และการแทนที่เถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15 ทำให้กำลังอัดมีค่าสูงสุดเท่ากับ 513 กก./ซม.² เมื่อใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นโดยมากกว่าร้อยละ 25 ค่ากำลังอัดมีค่าลดลงและมีค่าต่ำสุดเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินถึงร้อยละ 50 ซึ่งแนวโน้มของค่ากำลังอัดที่ทดสอบได้ มีทิศทางเดียวกับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินทุกอัตราส่วนการแทนที่ และการใช้เถ้าถ่านหินผสมคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้นกำลังอัดมีค่าลดลง

กำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำประปา 365 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นจากกำลังอัดที่อายุ 28 วันทุกส่วนผสม คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45, 0.55 และ 0.65 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 580, 513 และ 422 กก./ซม.² ตามลำดับ เป็นค่ากำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม และเป็นค่ากำลังอัดที่สูงสุดของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน เมื่อพิจารณาถึงการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำประปา อายุ 365 วัน พบว่า อัตราส่วนการเพิ่มของกำลังอัด มีค่าในช่วงร้อยละ 112 ถึง 135 ของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ซึ่งปัจจัยส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ที่ทำให้คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินมีการพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่องในระยะยาว

4.5.1.2 กำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล

หลังจากนำคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง จนมีอายุครบ 180 วัน พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตทุกสัดส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีกำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 119 ถึง 132 ของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และพบว่าคอนกรีตควบคุมทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน มีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดหลังจากแช่น้ำทะเล สูงกว่าคอนกรีตกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินเล็กน้อย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วผลของปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินน่าจะส่งผลให้อัตราการเพิ่มของกำลังอัดในระยะยาวสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน เมื่อพิจารณาเฉพาะคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน กำลังอัดของคอนกรีตที่มีปริมาณเถ้าถ่านหินต่ำจะให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูง ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน แต่เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม แนวโน้มการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินที่มีผลต่อกำลังอัดกลับไม่มีทิศทางที่ชัดเจน

ตารางที่ 4.5 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินอิน. พี. เอส. ซึ่งบ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน และ 12 เดือน และที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 6 และ 12 เดือน

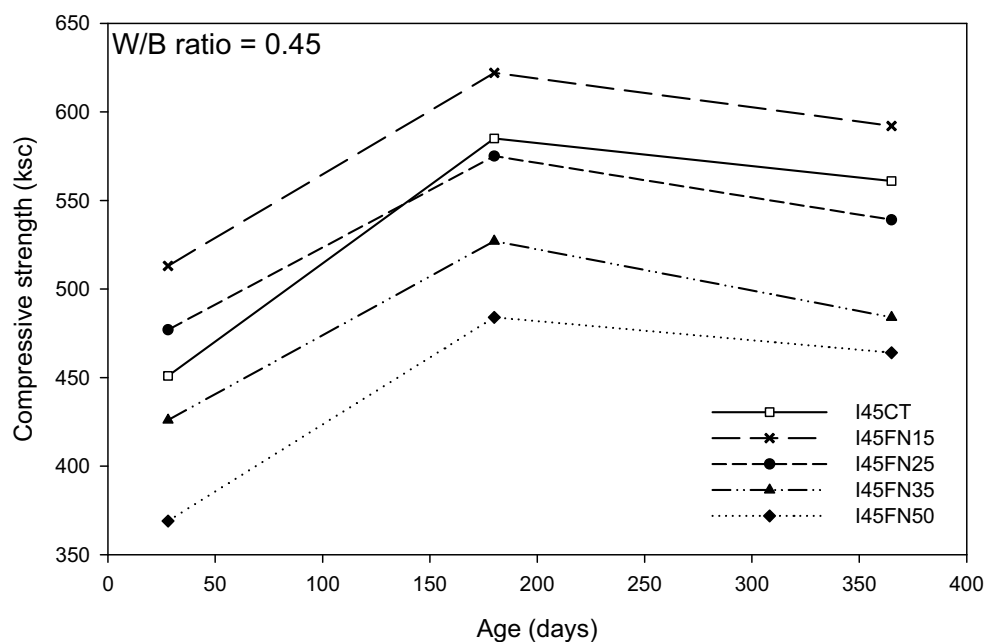
Type of concrete	Compressive strength (<i>ksc</i>)				Curing in W	Exposure in SW	
	Curing in water		Exposure in sea water		365-D / 28-D (%)	365-D in SW / 180-D in SW (%)	365-D in SW / 365-D in W (%)
	28-D	365-D	180-D	365-D			
I45CT	451	545	585	561	121	96	103
I45FN15	513	580	622	592	113	95	102
I45FN25	477	533	575	539	112	94	101
I45FN35	426	478	527	484	112	92	101
I45FN50	369	442	484	464	120	96	105
I55CT	395	501	507	457	127	90	91
I55FN15	384	513	475	487	134	103	95
I55FN25	384	470	464	449	122	97	96
I55FN35	363	433	438	420	119	96	97
I55FN50	327	388	398	381	119	96	98
I65CT	309	390	408	411	126	101	105
I65FN15	331	422	417	412	127	99	98
I65FN25	316	411	392	393	130	100	96
I65FN35	286	357	341	332	125	94	93
I65FN50	254	343	325	327	135	101	95

Remark: W = Water, SW = Sea water, D = Day

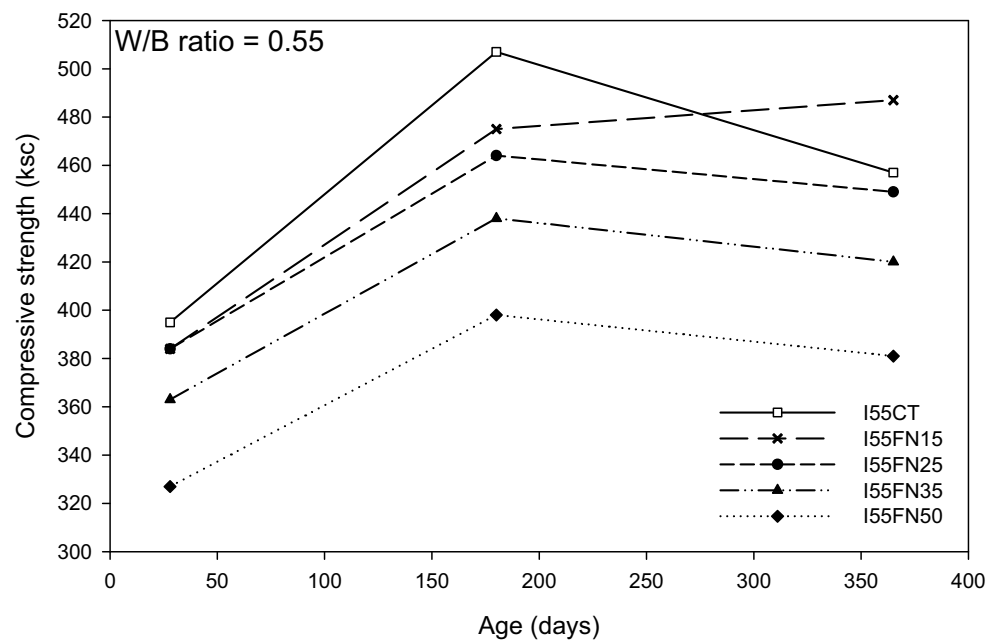
รูปที่ 4.10-4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินอิน. พี. เอส. ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ โดยภาพรวมกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุการแช่น้ำทะเล 365 วัน มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่อายุการแช่น้ำทะเล 180 วัน ยกเว้น คอนกรีต I55FN15, I65CT, I65FN25 และ I65FN50 ซึ่งมีกำลังอัดที่อายุการแช่น้ำทะเล 365 วัน สูงกว่าคอนกรีตที่อายุการทดสอบ 180 วัน เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ในน้ำทะเล กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$ หรือ Brucite) และยิปซัม (Gypsum) (Hewlett, 1998; Santhanam, et al., 2003) โดย Brucite จะเคลือบที่ผิวของคอนกรีต และยิปซัมจะก่อ

ตัวเป็นชั้นที่ด้านหลังของ Brucite ซึ่งเป็นผลให้คอนกรีตมีความแน่นขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดในช่วงอายุการแช่น้ำทะเล 180 วันมีค่าสูงมาก และเมื่อผ่านพ้นช่วงเวลาดังกล่าว Brucite จะเริ่มโดนทำลายจากการขยายตัวและการเกิดแรงดันภายในคอนกรีต อันเนื่องมาจากสารละลายซัลเฟต เป็นผลให้กำลังอัดที่อายุการทดสอบ 365 วัน มีค่าต่ำลง ผลการทดสอบที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของวิเชียร ชาติ (2546) ที่รายงานว่า คอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลจะมีกำลังอัดสูงขึ้นค่อนข้างมากในช่วง 240 วัน และมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึงอายุ 365 วัน หลังจากนั้นกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยหรือเกือบคงที่

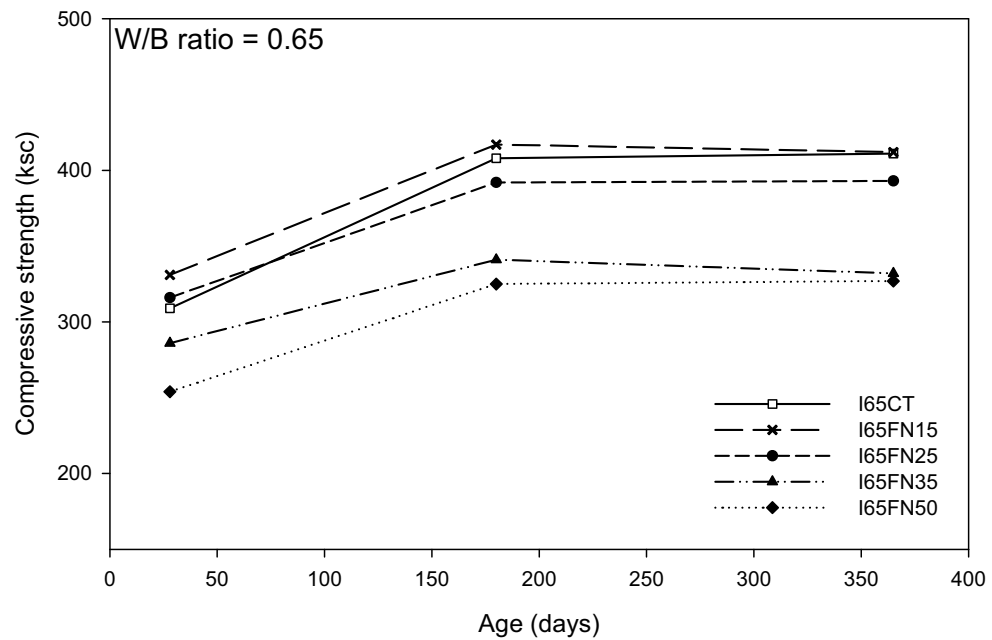
ที่อายุการแช่น้ำทะเล 365 วัน กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอน. พี. เอส. ในอัตราส่วนร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยกำลังอัดของคอนกรีต I45FN15, I55FN25 และ I65FN15 มีค่าเท่ากับ 592, 487 และ 412 กก./ซม.² ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอน. พี. เอส. ในปริมาณที่มากขึ้นโดยมากกว่าร้อยละ 15 ค่ากำลังอัดมีค่าลดลงและมีค่าต่ำสุดเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินถึงร้อยละ 50



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอน. พี. เอส. W/B ratio = 0.45 ซึ่งแช่ในน้ำทะเล

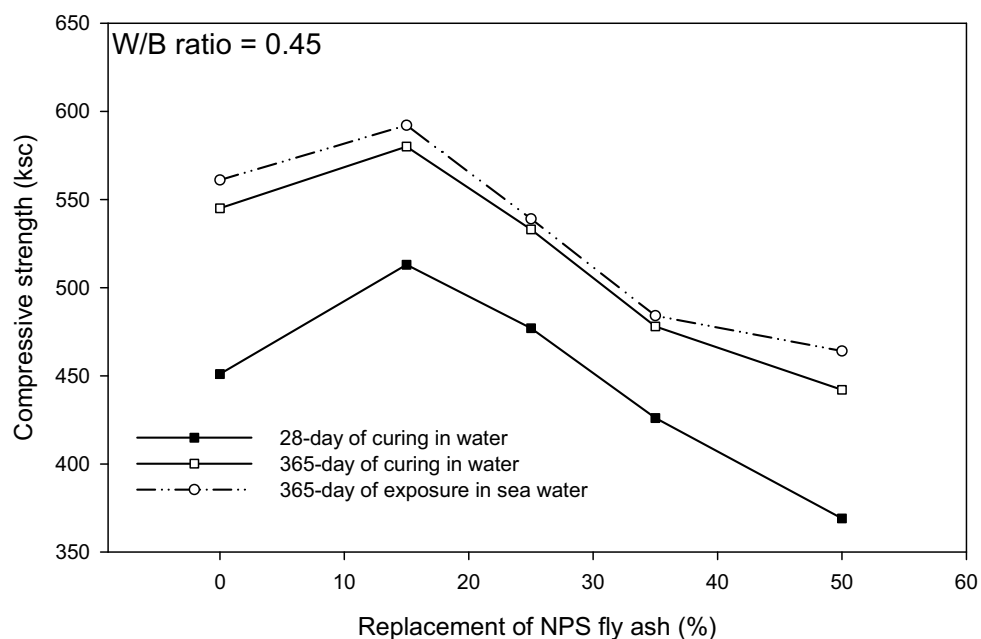


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบคอนกรีต
ที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอน. พี. เอส. W/B ratio = 0.55 ซึ่งแช่ในน้ำทะเล

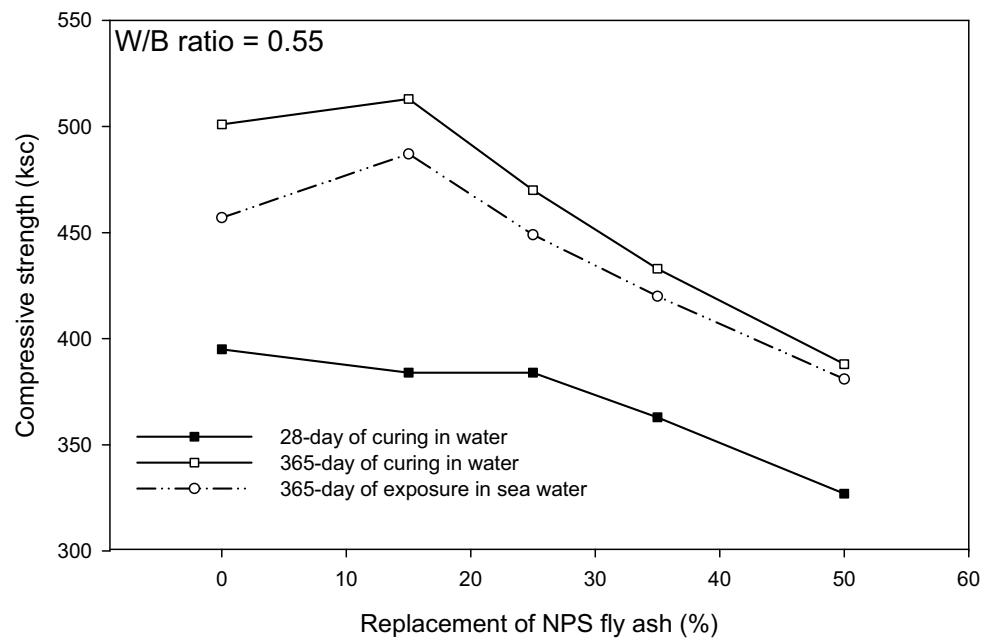


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบคอนกรีต
ที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอน. พี. เอส. W/B ratio = 0.65 ซึ่งแช่ในน้ำทะเล

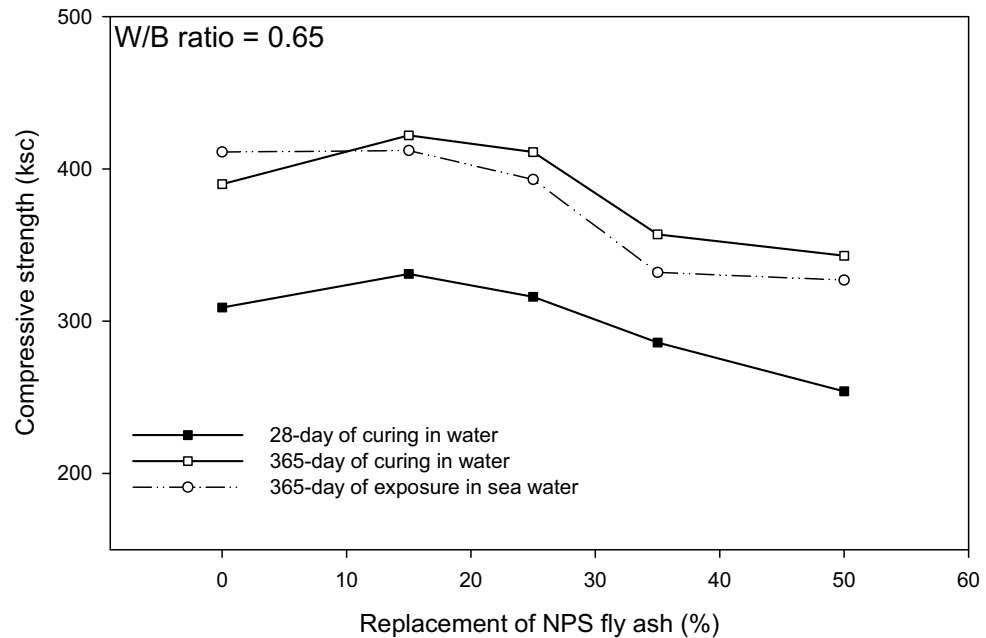
พิจารณารูปที่ 4.14 และ 4.15 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 365 วัน มีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลที่ระยะเวลาเดียวกัน เนื่องจากคอนกรีตที่แช่ในน้ำประปา จะอยู่ในสภาวะที่ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์และต่อเนื่อง โดยไม่มีสิ่งใดมารบกวน ขณะที่คอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลจะเกิดกระบวนการกัดกร่อนทั้งทางกายภาพ อุณหภูมิ ความชื้น และสารเคมี โดยเฉพาะสารประกอบคลอไรด์และซัลเฟต ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ซึ่งเป็นแนวโน้มที่เกิดกับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และ 0.65 ส่วนคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 กำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปา เนื่องจากคอนกรีตมีความทึบน้ำค่อนข้างสูง ดังนั้นการกัดกร่อนของสภาวะแวดล้อมทางทะเลในช่วง 365 วัน จึงไม่ค่อยมีผลต่อคอนกรีตมากนัก อีกทั้งยังได้รับปัจจัยเกื้อหนุนจาก Brucite และยิปซัม ซึ่งเป็นผลิตผลจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมซัลเฟต ($Mg(SO_4)$) กับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ช่วยในการอุดโพรงหรือช่องว่างของคอนกรีต และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.13 พบว่า เส้นกราฟของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาและคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลมีความใกล้เคียงกันมาก จนเกือบจะเป็นเส้นเดียวกัน



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหิน
เอน. พี. เอส. ในปูนซีเมนต์ ของคอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.45



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหิน
เอ็น. พี. เอส. ในปูนซีเมนต์ ของคอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.55



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหิน
เอ็น. พี. เอส. ในปูนซีเมนต์ ของคอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.65

4.5.2 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

4.5.2.1 กำลังอัดของคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V

ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.16 พบว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลถึง 5 ปี ของทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีกำลังอัดลดลงจากอายุ 28 วัน โดยแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของคอนกรีตทั้ง 2 กลุ่มมีลักษณะที่คล้ายกัน กล่าวคือ กำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 3 ปี มีค่าลดลงจากกำลังอัดที่อายุ 28 วัน แต่ในช่วงที่คอนกรีตแช่น้ำทะเลระหว่างอายุ 3 ถึง 5 ปี พบว่ากำลังอัดคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งเกือบถือได้ว่าสภาวะแวดล้อมทะเลไม่มีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงในช่วงอายุที่แช่น้ำทะเลถึง 5 ปี แต่ทั้งนี้การลดลงของกำลังอัดจาก 28 วัน มีผลมาจากลักษณะของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบแตกต่างกัน กล่าวคือการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. แต่ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัดเมื่อนำคอนกรีตไปแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลได้จากการเจาะตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ โดยตัวอย่างที่เจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. สูง 100 มม.

4.5.2.2 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

ตารางที่ 4.6 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลถึงระยะเวลา 5 ปี ผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินทั้งที่แยกและไม่แยกขนาดมีการพัฒนากำลังอัดจากอายุ 28 วัน ถึงอายุที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี โดยลักษณะของการพัฒนากำลังอัดแตกต่างจากคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน กล่าวคือ กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นจากอายุ 28 วัน ถึง 3 ปี และมีการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดอย่างต่อเนื่องจนถึงอายุแช่น้ำทะเล 5 ปี ในขณะที่กำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าลดลงในช่วงอายุ 28 วัน ถึงอายุแช่น้ำทะเล 3 ปี แต่อย่างไรก็ตามลักษณะตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และกลุ่มที่แช่น้ำทะเลแตกต่างกันดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว ในการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตในช่วงอายุที่แช่น้ำทะเล 3 ถึง 5 ปี ใช้ตัวอย่างที่ได้จากการเจาะเหมือนกัน ซึ่งพบว่ากำลังอัดมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงอายุแช่น้ำทะเล 5 ปี โดยเมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินและคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินตามรูปที่ 4.17 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่อายุ 28 วัน ต่ำกว่ากลุ่มที่ไม่ได้แทนที่เถ้าถ่านหินที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน แต่เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล ถึง 5 ปี พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินมีการพัฒนากำลังอัดได้ใกล้เคียงหรือสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้แทนที่เถ้าถ่านหิน โดยเฉพาะในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ซึ่งโดยภาพรวมแล้วอัตราการเพิ่มของกำลังอัดในคอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 50 มีค่าสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Monteiro และ Kurtis, 2003) แม้ว่าคอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 50 มีการพัฒนากำลังอัดที่ดี แต่พบว่ากำลังอัดที่แช่น้ำทะเล 5 ปี มีค่าต่ำที่สุดของแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เนื่องจาก

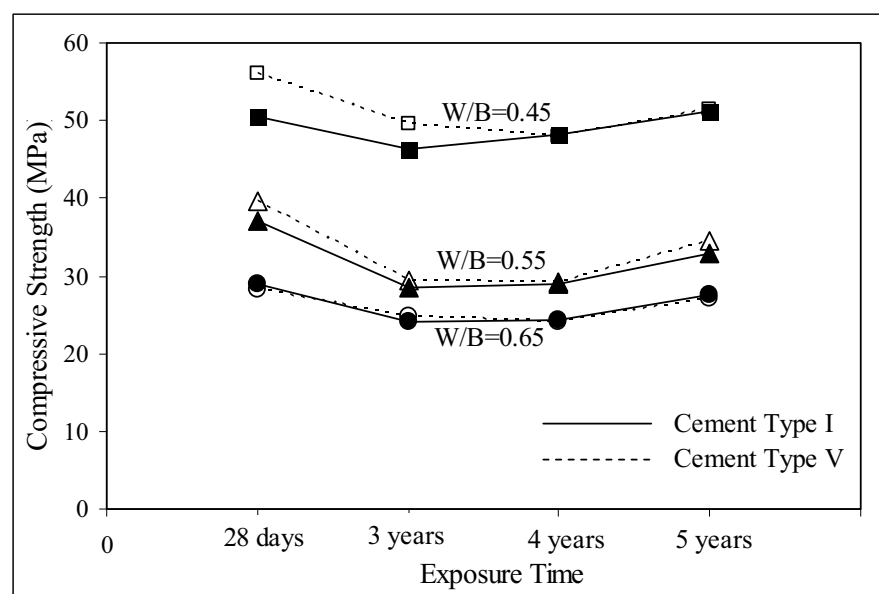
กำลังอัดเริ่มต้นมีค่าต่ำ และพบว่าการแทนที่เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดถึงร้อยละ 50 แม้ว่าจะมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I มากที่อายุ 28 วัน แต่กำลังอัดระยะยาวที่อายุ 5 ปี ได้พัฒนาจนมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V โดยเฉพาะในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65

ตารางที่ 4.6 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ซึ่งแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

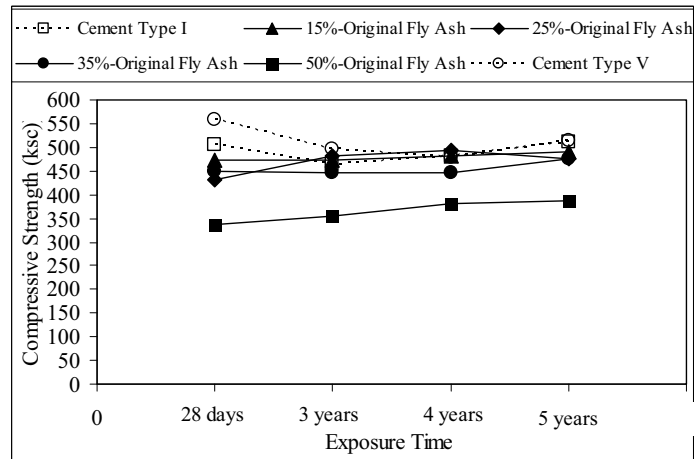
Mix	Compressive strength (ksc)				Mix	Compressive strength (ksc)			
	28-day curing	3-year exposure	4-year exposure	5-year exposure		28-day curing	3-year exposure	4-year exposure	5-year exposure
I45	504	463	483	511	I55O50	209	265	273	286
V45	560	496	469	514	I55F15	409	423	398	390
I45O15	474	473	482	491	I55F25	418	429	390	415
I45O25	432	482	493	476	I55F35	362	433	423	430
I45O35	450	447	446	476	I55F50	255	320	328	347
I45O50	338	355	362	387	I65	290	240	244	276
I45F15	482	550	504	506	V65	283	248	241	270
I45F25	434	513	502	506	I65O15	199	278	287	283
I45F35	461	532	507	539	I65O25	210	271	278	293
I45F50	374	431	442	482	I65O35	229	283	310	323
I55	370	284	273	330	I65O50	166	238	242	246
V55	395	294	273	345	I65F15	242	299	306	344
I55O15	321	342	347	374	I65F25	265	345	356	351
I55O25	303	325	335	347	I65F35	287	293	309	330
I55O35	327	331	340	331	I65F50	197	280	278	294

เมื่อพิจารณาร้อยละของกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เมื่อเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มที่แทนที่เถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมมีการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดมากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินอย่างชัดเจน โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แยกและไม่แยกขนาดมีการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดไม่ต่างกันมากนัก ทั้งที่กลุ่มที่แทนที่เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดกว่าน่าจะมีร้อยละของกำลังอัดที่สูงกว่า แต่ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแยกขนาดมีกำลังอัดที่สูงอยู่แล้วที่อายุ 28 วัน ดังนั้นจึงทำให้ร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 5 ปีไม่

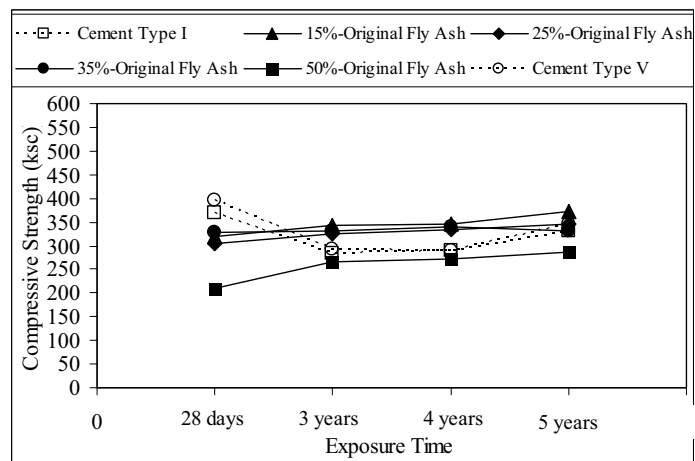
สูงมากนัก แต่อย่างไรก็ตามกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแยกขนาดที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกันมีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่แยกขนาดค่อนข้างชัดเจน (ตามตารางที่ 4.6) ทั้งนี้เนื่องมาจากกำลังอัดเริ่มต้นที่สูงกว่า แต่การพัฒนากำลังในระยะยาวในสภาพแวดล้อมทะเลแทบไม่แตกต่างกัน การเพิ่มของกำลังอัดในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่มีการพัฒนากำลังอัดในระยะเวลาที่นานขึ้น ตลอดจนผลของเถ้าถ่านหินที่ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำลดการซึมผ่านของซัลเฟตเข้าไปในเนื้อคอนกรีต รวมทั้งเถ้าถ่านหินยังช่วยลดปริมาณสารตั้งต้น (แคลเซียมไฮดรอกไซด์) ในคอนกรีตที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับซัลเฟตและส่งผลเสียต่อกำลังอัดของคอนกรีตลงได้ โดยทั่วไปแล้วสารประกอบซัลเฟตในน้ำทะเลจะส่งผลโดยตรงต่อกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากซัลเฟตเข้าไปทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ผลเป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต หรือ Ettringite และแคลเซียมซัลเฟต (ยิปซัม) ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้ส่งผลเสียต่อคอนกรีต โดยทำให้คอนกรีตขยายตัว เกิดการแตกร้าว และสูญเสียกำลังได้ น้ำทะเลที่ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี มีความเข้มข้นของสารประกอบซัลเฟตประมาณร้อยละ 0.22-0.26 ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเทียบกับปริมาณที่ใช้ศึกษาในห้องปฏิบัติการ (ประมาณร้อยละ 2-5) (Monteiro และ Kurtis, 2003; Goktepe, et al., 2006) รวมทั้งบริเวณที่นำคอนกรีตไปแช่เป็นบริเวณชายฝั่งที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งตามลักษณะของการขึ้น-ลง ของน้ำ ดังนั้นผลกระทบของซัลเฟตที่มีในน้ำทะเลต่อกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงระยะเวลา 5 ปี จึงมีผลไม่มากนัก ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตในกลุ่มที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน มีแนวโน้มที่ดีกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินเพราะเป็นการพัฒนากำลังอัดตามระยะเวลาที่เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานมากกว่า อย่างไรก็ตามสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เช่น การเสียดสีของหินทราย แรงกระแทกของคลื่น ความชื้น อุณหภูมิ และอื่นๆ ล้วนมีผลต่อการทำลายคอนกรีตในสภาพแวดล้อมน้ำทะเลทั้งสิ้น



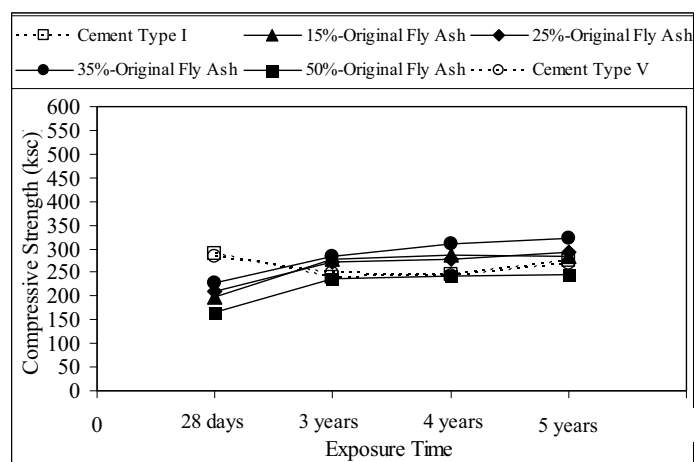
รูปที่ 4.16 กำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 3, 4 และ 5 ปี



(ก) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.45

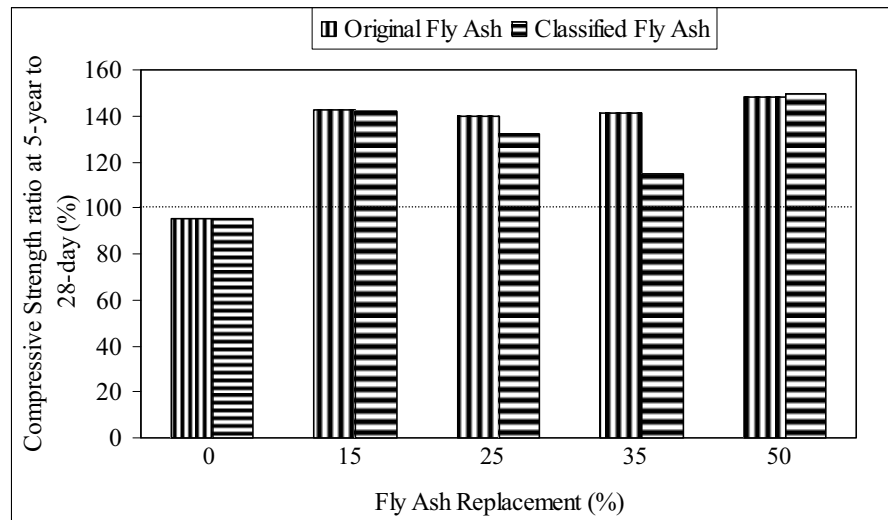


(ข) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.55



(ค) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.65

รูปที่ 4.17 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่แยกขนาด เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 3, 4 และ 5 ปี



รูปที่ 4.18 ร้อยละของกำลังอัดคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่แช่น้ำทะเล 5 ปี ต่อกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

4.6 การทดสอบคลอไรด์ในคอนกรีต

ขั้นตอนการทดสอบคลอไรด์เริ่มต้นจากการเจาะคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์บริเวณกึ่งกลางก้อน นำแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่ได้ตัดเป็นชิ้นๆ ละ 1 ซม. จำนวนไม่น้อยกว่า 3 ชิ้น จำนวนชิ้นที่ทำการตัด ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่คอนกรีตแช่อยู่ในน้ำทะเล หากคอนกรีตนั้นแช่อยู่ในทะเลเป็นเวลานานก็ตัดแท่งคอนกรีตมากขึ้น เพื่อให้ข้อมูล Chloride penetration profile ที่มีความสมบูรณ์ จากนั้นนำคอนกรีตแต่ละชิ้นไปบดละเอียด เพื่อทำการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride)

4.6.1 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ที่บดละเอียดจนมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 2.0

ตารางที่ 4.7 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่ระยะความลึกต่างๆ เมื่อพิจารณา คอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้น มีการซึมผ่านของคลอไรด์สูงขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ย่อมมีความทึบน้ำและความสามารถในการซึมผ่านน้ำต่ำกว่า คอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ดังนั้นการซึมผ่านของคลอไรด์จึงมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำลง

ที่ระยะความลึก 5 มม. จากผิวหน้าของคอนกรีตทุกส่วนผสม พบปริมาณคลอไรด์ค่อนข้างสูง และมีความแปรปรวนของข้อมูล อันเนื่องมาจากเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้ผิวหน้าของคอนกรีต ซึ่งได้รับ

ผลกระทบทั้งทางกายภาพและเคมีของน้ำทะเลสูง ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ถึงแนวโน้มของคลอไรด์ที่ระยะความลึกดังกล่าวได้แม่นยำ แต่ที่ระยะความลึกที่มากขึ้นพบว่าปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตมีความชัดเจนและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

ตารางที่ 4.7 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอน. พี. เอส.

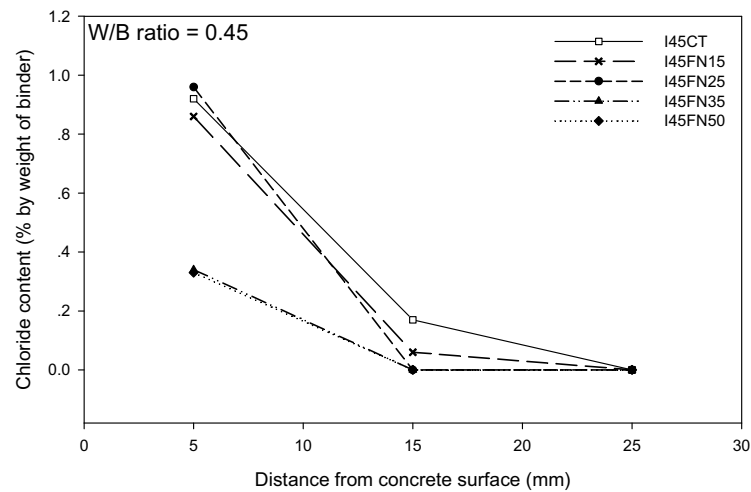
Type of concrete	Chloride content (% by weight of binder)					
	180-day			365-day		
	5 mm.	15 mm.	25 mm.	5 mm.	15 mm.	25 mm.
I45CT	0.92	0.17	0.00	4.35	1.03	0.11
I45FN15	0.86	0.06	0.00	3.38	0.29	0.00
I45FN25	0.96	0.00	0.00	3.06	0.06	0.00
I45FN35	0.34	0.00	0.00	3.33	0.06	0.00
I45FN50	0.33	0.00	0.00	2.78	0.06	0.00
I55CT	1.46	0.69	0.21	6.26	2.85	0.33
I55FN15	2.01	0.55	0.00	4.43	1.87	0.14
I55FN25	2.21	0.55	0.00	4.01	0.48	0.00
I55FN35	0.55	0.14	0.00	4.00	0.28	0.07
I55FN50	0.89	0.00	0.00	3.23	0.07	0.00
I65CT	1.96	1.23	0.41	8.53	5.66	1.39
I65FN15	2.29	0.25	0.08	5.96	3.51	0.41
I65FN25	1.06	0.08	0.00	6.29	2.12	0.33
I65FN35	1.86	0.08	0.00	5.05	0.90	0.08
I65FN50	0.48	0.00	0.00	4.09	0.32	0.00

คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ทุกระดับความลึก มีแนวโน้มน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคนาโนขนาดเล็กของเถ้าถ่านหินจะเข้ามาอุดช่องว่างของเนื้อคอนกรีต ตลอดจนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งช่วยลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น และพบว่าเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปจะมีค่าลดลง เช่น เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ

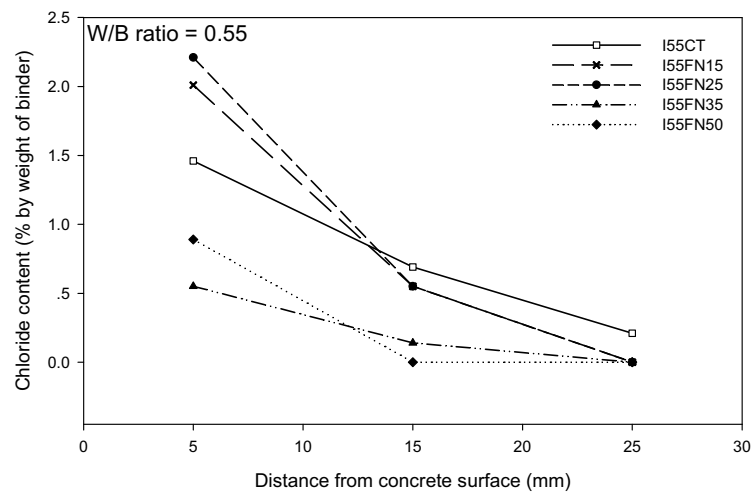
ประสานเท่ากับ 0.65 ซึ่งแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน ที่ระดับความลึก 15 มม. คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 0.25, 0.08, 0.08 และ 0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตควบคุม I65CT มีปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 1.23 แสดงว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น ให้ผลในการต้านทานการซึมผ่านของสารประกอบคลอไรด์ได้ดีขึ้น ขณะที่ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่อายุการแช่น้ำทะเล 365 วัน ก็ให้ผลในทิศทางเดียวกัน คือ ที่ระดับความลึก 15 มม. ปริมาณคลอไรด์มีค่าร้อยละ 5.66, 3.51, 2.12, 0.90 และ 0.32 สำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 ตามลำดับ

ถ้าพิจารณาปริมาณคลอไรด์ที่ร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าคอนกรีต I65FN50 มีปริมาณคลอไรด์ดังกล่าวที่ระยะความลึก 9.2 มม. จากผิวหน้าคอนกรีต ในขณะที่คอนกรีตควบคุม I65CT และ I45CT พบที่ระดับความลึก 22.4 และ 10.6 มม. ตามลำดับ ซึ่งปริมาณคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 ในคอนกรีตสามารถทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมได้ (Glass และ Buenfeld, 1997) ดังนั้นการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมดังกล่าว ต้องการระยะหุ้มของคอนกรีตควบคุม I65CT และ I45CT อย่างต่ำ 22.4 และ 10.6 มม. ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีต I65FN50 ที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 ต้องการระยะหุ้มเพียง 9.2 มม. เท่านั้น แสดงให้เห็นว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 50 สามารถป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เปื้อนสนิมได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ซึ่งมีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

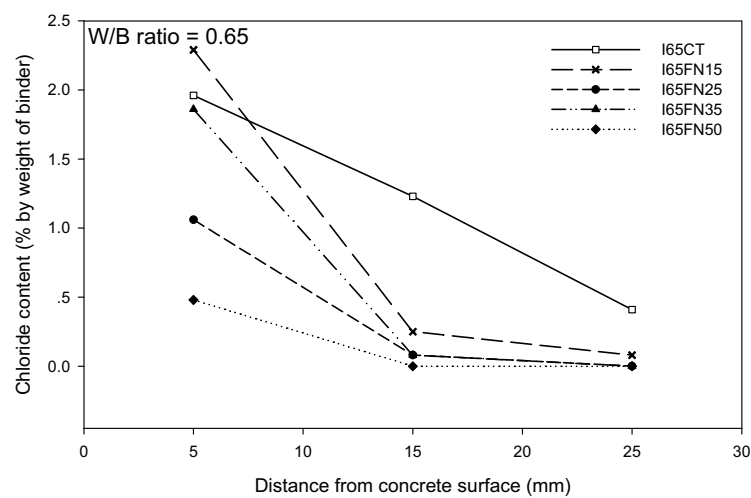
รูปที่ 4.19 และ 4.20 แสดงให้เห็นว่า เมื่ออายุการแช่น้ำทะเลเพิ่มขึ้นจาก 180 วัน เป็น 365 วัน คลอไรด์สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในคอนกรีตมากยิ่งขึ้น และมีปริมาณที่ค่อนข้างสูง ถ้าพิจารณาคอนกรีต I65CT ที่ระยะความลึก 25 มม. ปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 0.41 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถซึมเข้าคอนกรีตโดยใช้เวลา 180 วัน นั่นคือ เมื่อคอนกรีตแช่น้ำทะเลครบ 365 วัน ที่ระยะความลึกนี้ ต้องมีปริมาณคลอไรด์มากกว่าร้อยละ 0.41 เมื่อทำการทดสอบจึงพบว่า มีปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 1.39 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งปริมาณคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 3 เท่าของปริมาณคลอไรด์ที่อายุ 180 วัน จึงเป็นสาเหตุที่ต้องทำการเก็บผลการทดสอบต่อเนื่องไปในระยะยาว เพื่อให้ข้อมูลการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น



(ก) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.45

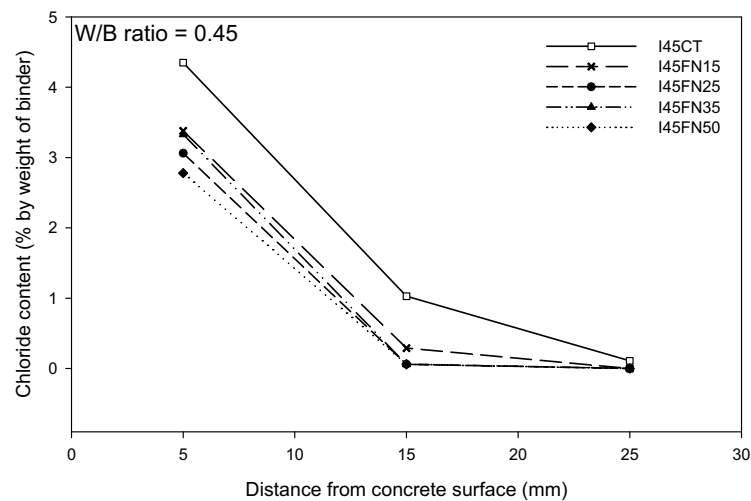


(ข) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.55

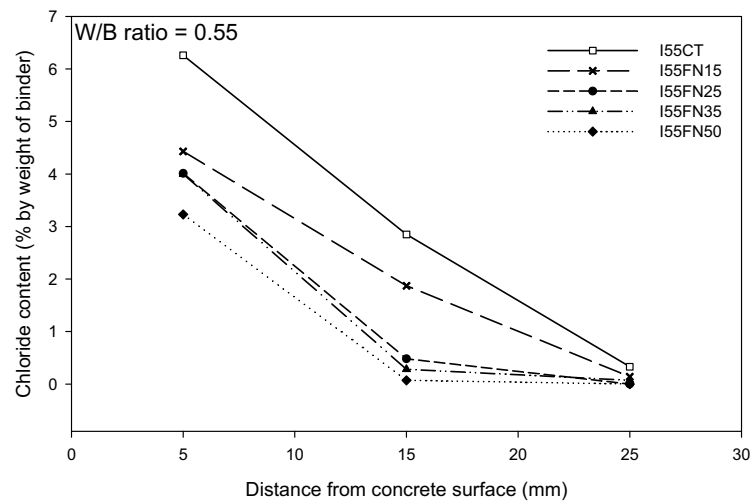


(ค) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.65

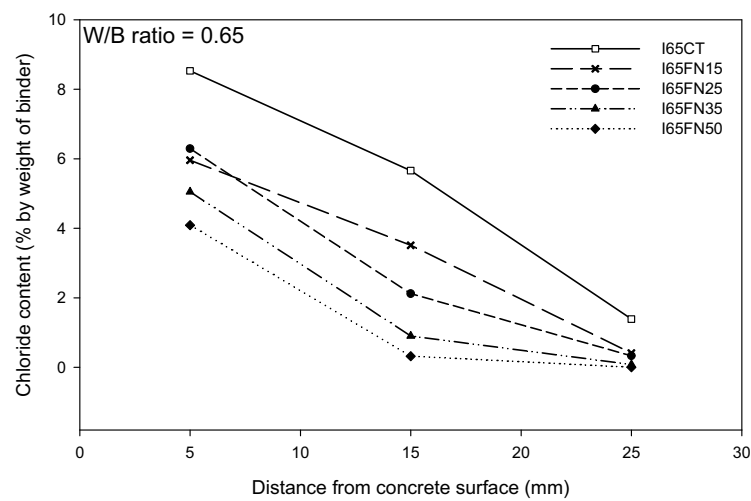
รูปที่ 4.19 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอน. พี. เอส.
ซึ่งแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน ที่ระยะความลึกต่างๆ



(ก) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.45



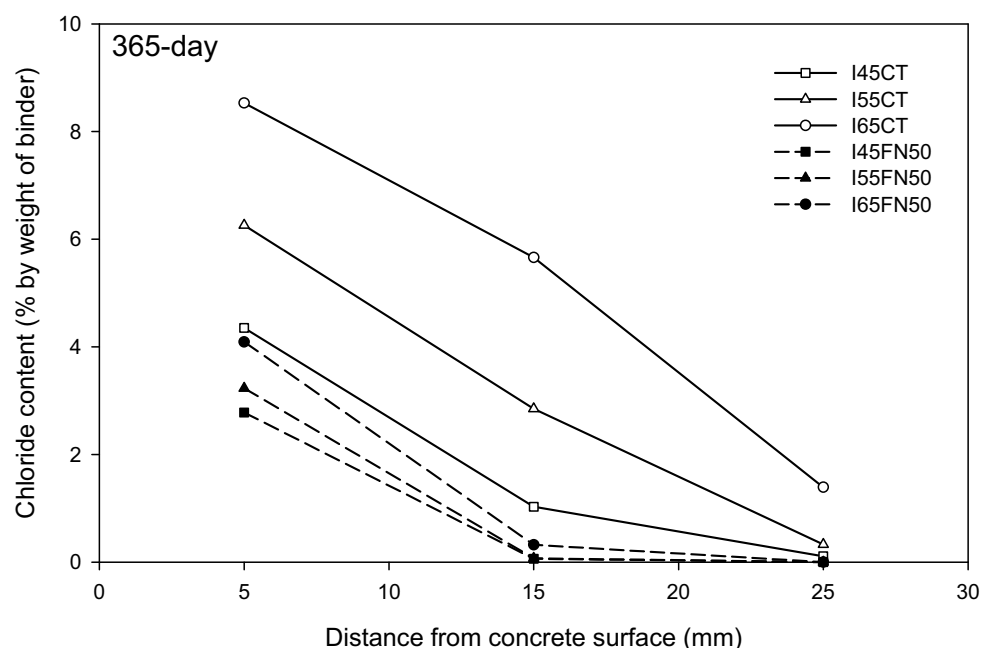
(ข) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.55



(ค) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.65

รูปที่ 4.20 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอน. พี. เอส. ซึ่งแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 365 วัน ที่ระยะความลึกต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของกำลังอัดและปริมาณเถ้าถ่านหินที่มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 4.21 กำลังอัดของคอนกรีตควบคุม I65CT, I55CT และ I45CT มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง และส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตลดลงด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น ซึ่งเห็นภาพได้ชัดเจนจากรูปที่ 4.21 แต่เมื่อผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่า ปริมาณเถ้าถ่านหินมีอิทธิพลต่อการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมซึ่งใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว



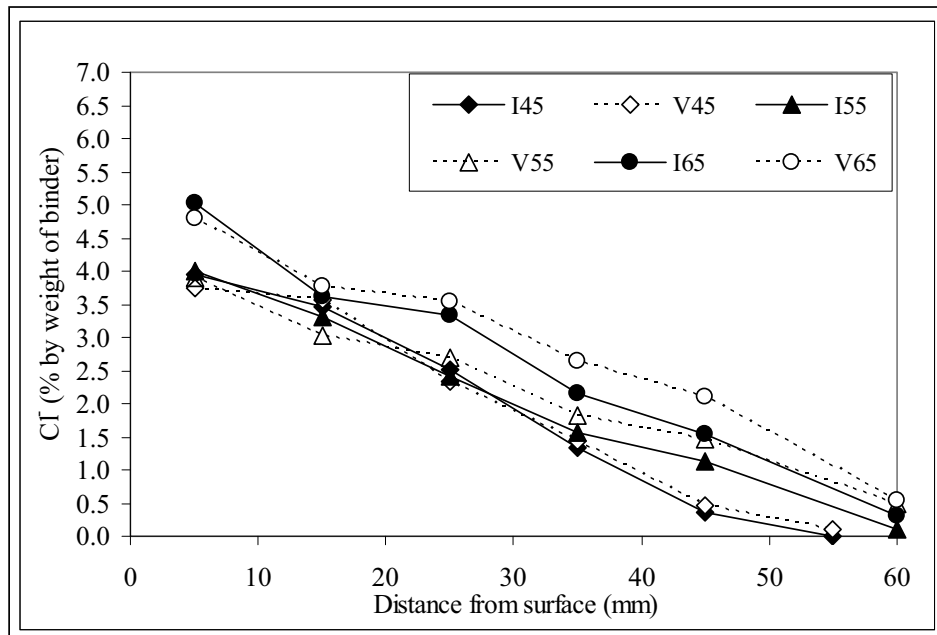
รูปที่ 4.21 ผลกระทบของกำลังอัดต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ ที่แช่น้ำทะเล 365 วัน เมื่อผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ร้อยละ 0 และ 50

4.6.2 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

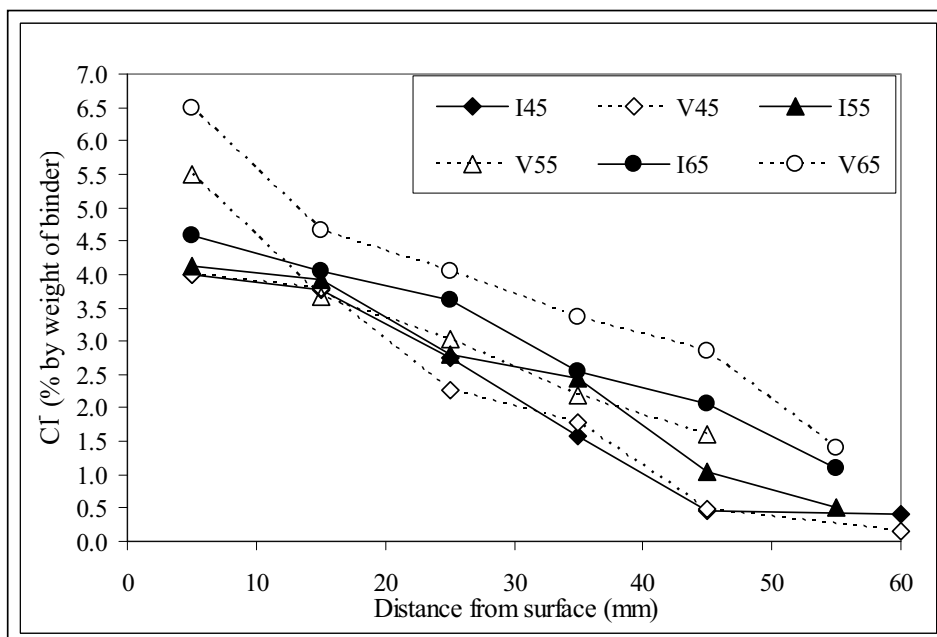
เมื่อพิจารณาปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I และ V ที่ระยะความลึกต่างๆจากผิวหน้าคอนกรีต ที่ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานตลอดอายุการแช่คอนกรีต 4 และ 5 ปี ดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่า ที่อายุแช่น้ำทะเล 4 ปี คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I มีแนวโน้มของการซึมเข้าของคลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V แต่เมื่อแช่น้ำทะเลถึงอายุ 5 ปี คอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I และ V มีปริมาณการซึมเข้าของคลอไรด์ใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่พบว่า คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I จะมีการซึมเข้าของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V เมื่อ

พิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณการซึมเข้าของคลอไรด์ พบว่าปริมาณคลอไรด์มีค่าต่ำลง เมื่อคอนกรีตมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับหลักความรู้โดยทั่วไปเกี่ยวกับคอนกรีตโดยคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำจะมีกำลังอัดสูงขึ้น มีความทึบน้ำมากขึ้นส่งผลให้การซึมผ่านของคลอไรด์มีค่าน้อยลง

ข้อมูลการซึมผ่านของสารประกอบคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 4 และ 5 ปี มีแนวโน้มที่ชัดเจนว่า การใช้คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะให้ผลในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ดังแสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I สามารถลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ โดยเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นจะลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าถ่านหินมีอนุภาคละเอียดเข้าไปอุดช่องว่างของเนื้อคอนกรีต ตลอดจนปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ลดจำนวนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายน้ำได้ เป็นผลให้คอนกรีตมีการซึมผ่านน้ำต่ำจึงสามารถลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ (ณรงค์ชัย วิวัฒนาช่าง และคณะ, 2542; Chindaprasirt, et al., 2007) ทั้งนี้ถ้าพิจารณาปริมาณคลอไรด์ที่ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลถึง 5 ปี พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่แยกขนาดร้อยละ 50 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 พบปริมาณคลอไรด์ดังกล่าวที่ระยะความลึก 18 มม. จากผิว ในขณะที่คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน พบที่ระดับความลึกจากผิว 40 และ 50 มม. ตามลำดับ ซึ่งปริมาณคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีตมีค่าสูงกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (Threshold Chloride) ที่แสดงไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมา (Chalee, et al., 2006; Thomas, 1996) นั้นแสดงให้เห็นว่าปริมาณคลอไรด์ขนาดนี้สามารถทำให้เหล็กเริ่มเกิดสนิมได้ และการป้องกันการถูกทำลายดังกล่าวภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี ต้องการระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กสำหรับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 อย่างต่ำ 40 และ 50 มม. ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่แยกขนาดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ร้อยละ 50 ต้องการระยะหุ้มเหล็กเพียง 18 มม. และถ้าใช้เถ้าถ่านหินที่แยกขนาดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เท่ากันต้องการระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพียง 13 มม. เท่านั้น

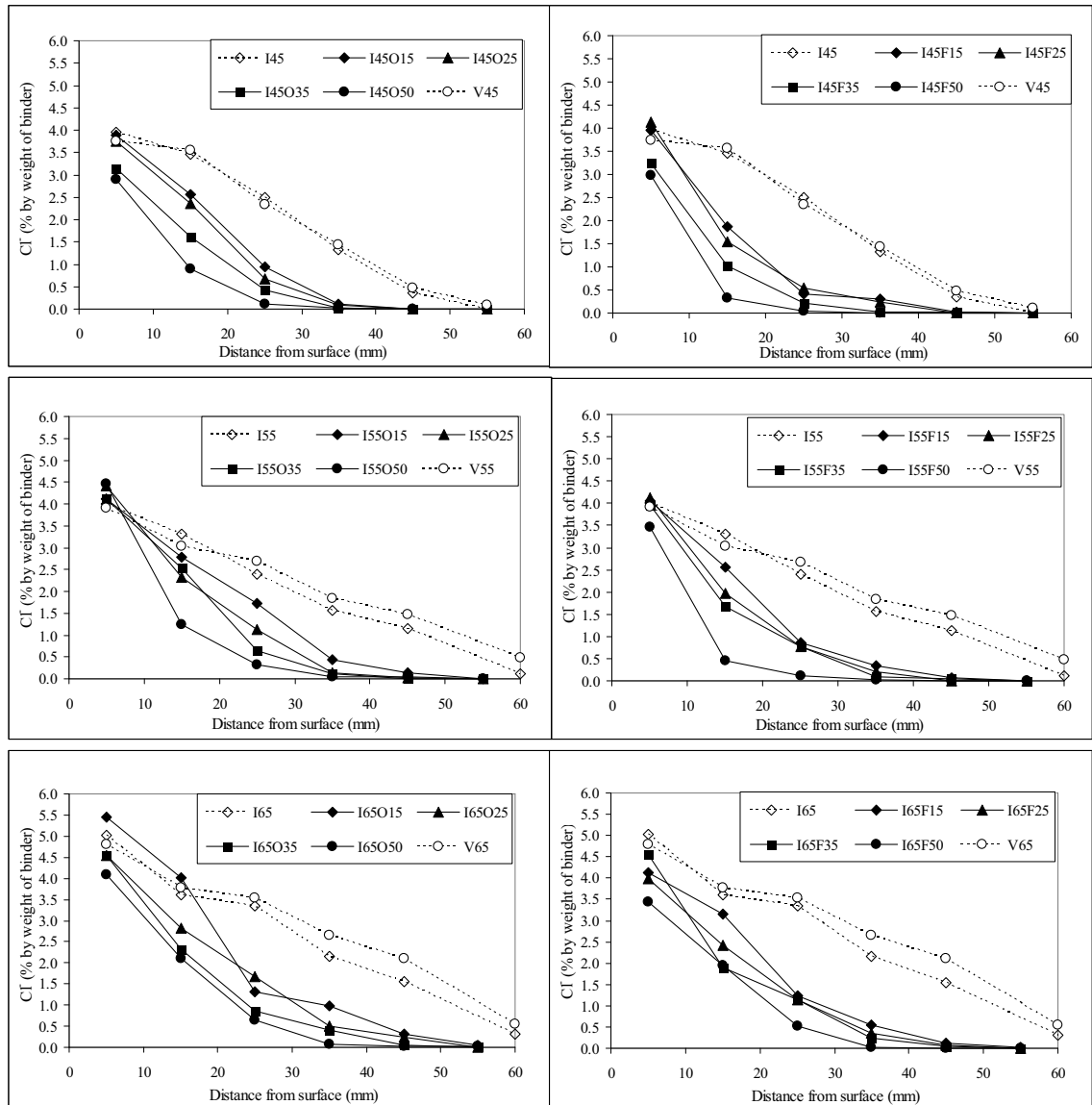


(ก) คอนกรีตที่มีอายุการแช่น้ำทะเล 4 ปี

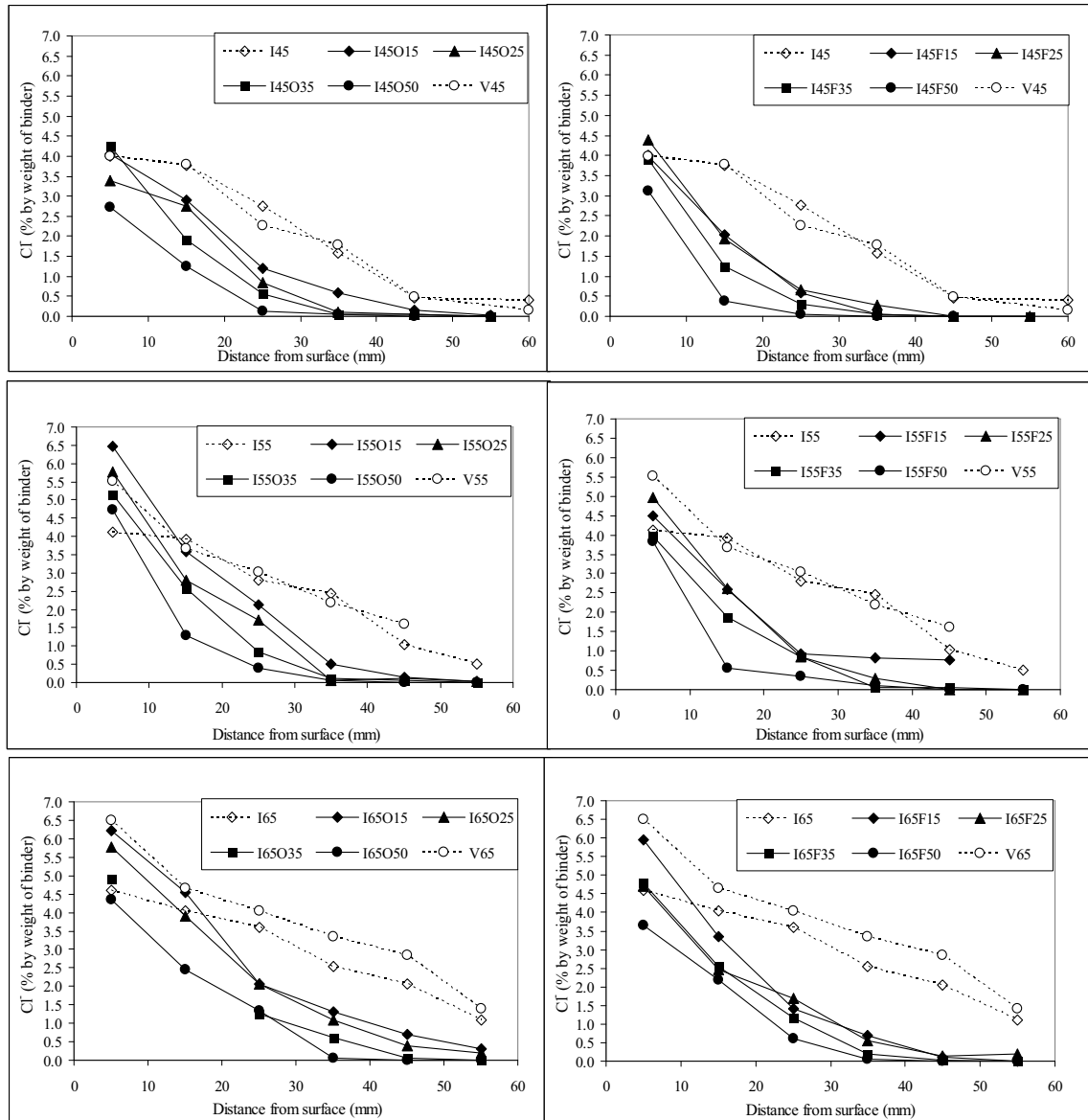


(ข) คอนกรีตที่มีอายุการแช่น้ำทะเล 5 ปี

รูปที่ 4.22 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V เมื่อแช่ในสถานะแวดล้อมทะเล

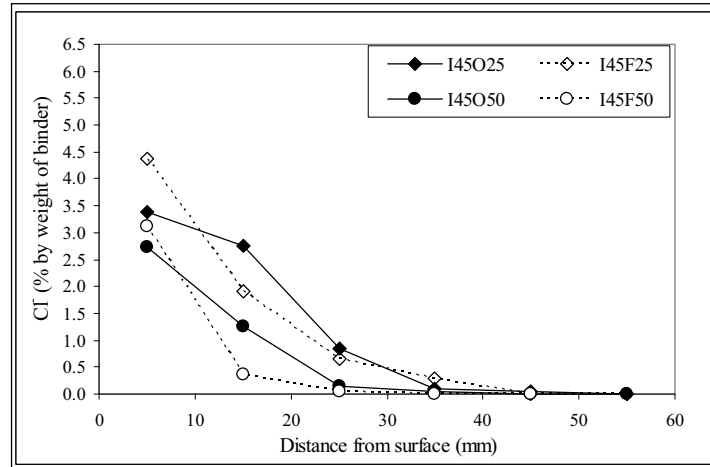


รูปที่ 4.23 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะเมื่อแช่ในน้ำทะเล 4 ปี

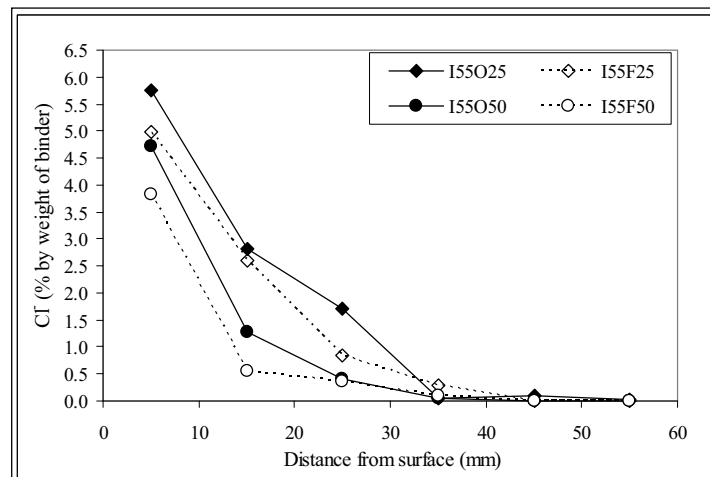


รูปที่ 4.24 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมแล้วผ่านหินแม่เมาะเมื่อแช่ในน้ำทะเล 5 ปี

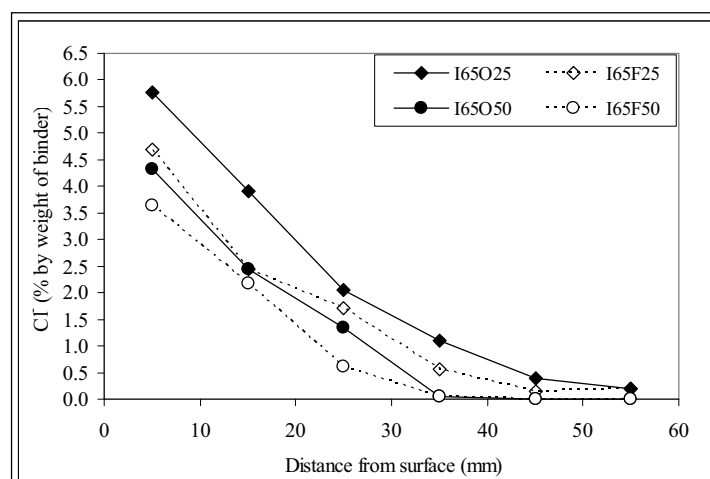
เมื่อพิจารณาการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทั้งที่ไม่ได้แยกและแยกขนาดร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 เมื่อแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่า แนวโน้มของการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ การใช้เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าการใช้เถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าถ่านหินที่ผ่านการคัดแยกขนาดจะมีอนุภาคที่เล็กส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและการเข้าไปอุดช่องว่างในคอนกรีตเป็นไปได้ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่ผ่านการแยกขนาด แต่อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะ ที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ถึงแม้จะนำมาใช้โดยตรง โดยไม่ผ่านการคัดแยกขนาดให้เล็กลง ก็ให้ผลเป็นที่น่าพอใจในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในสภาวะแวดล้อมทะเล และสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ใกล้เคียงกับกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาด ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะมีลักษณะค่อนข้างดี กล่าวคือ มีรูปทรงที่กลมและตัน ตลอดจนองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินก่อนแยกขนาด และหลังผ่านการแยกขนาดไม่แตกต่างกัน นั้นแสดงให้เห็นว่าเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะสามารถนำมาใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่จำเป็นต้องคัดแยกขนาดให้เล็กลง อย่างไรก็ตาม การคัดแยกขนาดให้เล็กลงทำให้การซึมผ่านของคลอไรด์ลดลงมากขึ้น และเพิ่มกำลังอัดให้แก่คอนกรีตได้เป็นอย่างดี



(ก) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.45



(ข) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.55



(ค) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.65

รูปที่ 4.25 ผลของความละเอียดของเส้นผ่านหินแม่เมาะต่อปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเส้นผ่านหินร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เมื่อแช่ในน้ำทะเล 5 ปี

4.7 การสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

หลังจากทำการเจาะคอนกรีตเพื่อนำตัวอย่างไปทดสอบคลอไรด์ที่ซึมเข้าในคอนกรีตเรียบร้อยแล้ว จึงนำคอนกรีตดังกล่าวมาทำการกดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดให้วับัติ จากนั้นเก็บแท่งเหล็กที่ฝังตามตำแหน่งระยะหุ้มต่างๆ เพื่อนำมาสำรวจความเป็นสนิมโดยการวัดพื้นที่การเกิดสนิม

4.7.1 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ที่บดละเอียดจนมีน้ำหนักดั่งบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 2.0

ความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังอยู่ที่ระยะหุ้มต่างๆ หลังจากคอนกรีตแช่อยู่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน พบว่า ที่ระยะหุ้ม 1 ซม. เหล็กที่ฝังอยู่ในคอนกรีตส่วนใหญ่ยังไม่เกิดสนิม ส่วนเหล็กที่เกิดสนิมจะเป็นเหล็กที่ฝังอยู่ในคอนกรีตควบคุมที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน และคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15 ซึ่งมีพื้นที่การเกิดสนิมไม่เกินร้อยละ 10 ของพื้นที่ทั้งหมด สำหรับที่ระยะหุ้ม 2 ซม. พบเหล็กที่เกิดสนิมในคอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 เท่านั้น แสดงให้เห็นว่า สารละลายคลอไรด์หรือสารเคมีอื่นในน้ำทะเลยังซึมเข้าไปไม่ถึงเหล็กที่ตำแหน่งระยะหุ้ม 5 และ 7.5 ซม.

เมื่อคอนกรีตมีอายุการแช่น้ำทะเลครบ 365 วัน พื้นที่ผิวของเหล็กเกิดสนิมมากกว่าคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 180 วัน ดังตารางที่ 4.8 โดยเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ทุกสัดส่วนผสมเกิดสนิมที่ระยะหุ้ม 1 ซม. ส่วนที่ระยะหุ้ม 2 ซม. มีเพียงคอนกรีตควบคุมที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินเท่านั้นที่เหล็กเป็นสนิม สำหรับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.55 จะมีแนวโน้มการเกิดสนิมน้อยกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 นั่นคือ สนิมเหล็กจะเกิดกับเหล็กที่ฝังในคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณน้อย โดยภาพรวมของคอนกรีตที่อายุการแช่น้ำทะเล 365 วัน พื้นที่ผิวเหล็กที่เกิดสนิมมีค่าไม่เกินร้อยละ 20 ของพื้นที่ทั้งหมดของแท่งเหล็ก

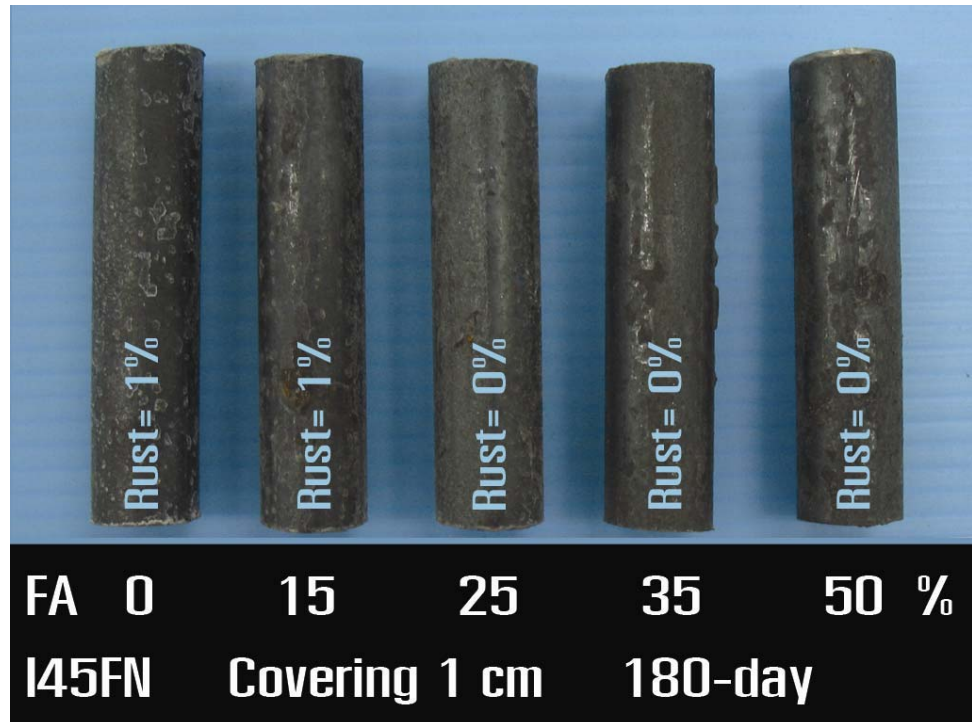
เมื่อนำแท่งเหล็กที่เกิดสนิมเนื่องจากคอนกรีตแช่น้ำทะเล 180 วันมาพิจารณา พบว่า สนิมเหล็กหรือออกไซด์ของเหล็กที่เกิดขึ้นเป็นเพียงคราบสนิมที่ติดอยู่บนผิวเหล็กเท่านั้น เมื่อนำแปรงทองเหลืองขัดบริเวณที่เกิดสนิม ปรากฏว่า สนิมหลุดออกจากผิวเหล็กอย่างง่ายดาย โดยที่แท่งเหล็กยังไม่มีร่องรอยของความเสียหายเนื่องการกัดกร่อน ส่วนแท่งเหล็กที่เกิดสนิมในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 365 วัน ลักษณะของสนิมที่เกิดขึ้นเป็นสนิมขุม (Pitting) สีน้ำตาลแดง โดยสนิมเริ่มกัดกร่อนผิวโลหะจนลึกเข้าไปในเนื้อเหล็ก ซึ่งสนิมที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาของเหล็กกับออกซิเจน โดยมีความชื้นและสารละลายคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ลักษณะพื้นที่การเกิดสนิมบนแท่งเหล็กจะเกิดขึ้นเฉพาะจุด ไม่

เกิดแบบกระจายกระจายไปทั่วทั้งแท่งเหล็ก แสดงให้เห็นว่า ที่ระยะเวลาการแช่น้ำทะเล 365 วัน สารละลายคลอไรด์เริ่มเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งที่เหล็กเกิดสนิมเท่านั้น ยังไม่ได้แพร่กระจายไปทั่วบริเวณระยะหุ้มดังกล่าว หากสารละลายคลอไรด์เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตไปแล้ว ลักษณะพื้นที่การเกิดสนิมบนแท่งเหล็กจะเกิดแบบกระจายทั่วทั้งแท่ง

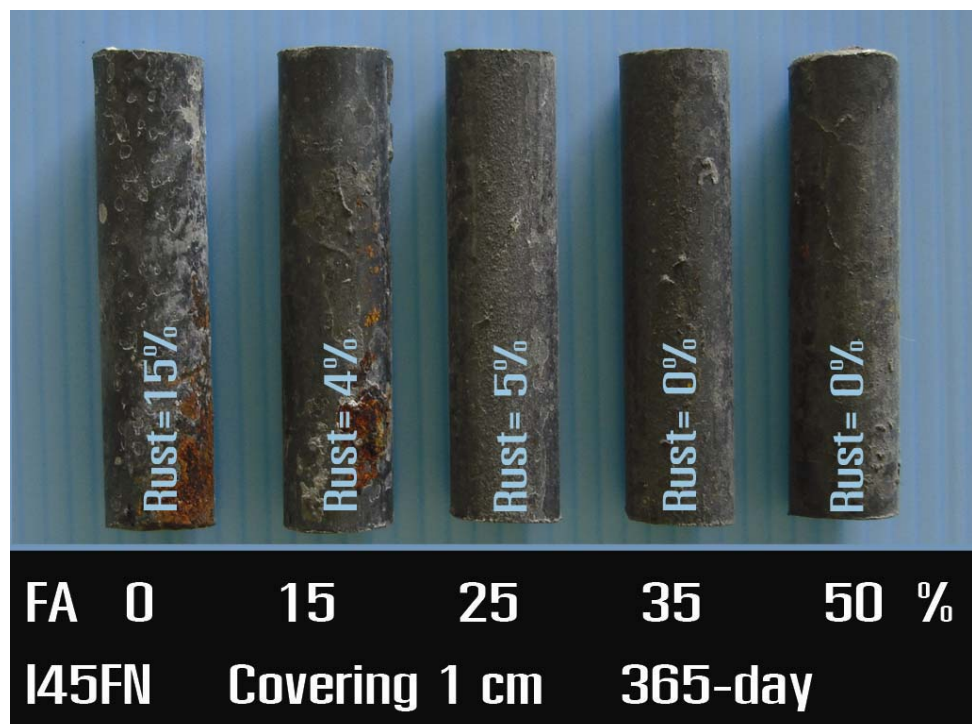
ตารางที่ 4.8 พื้นที่ผิวแท่งเหล็กที่เกิดสนิมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส.

Type of concrete	Rusted area of the embedded steel (%)			
	180-day exposure		365-day exposure	
	10 mm	20 mm	10 mm	20 mm
I45CT	1	0	15	0
I45FN15	1	0	4	0
I45FN25	0	0	5	0
I45FN35	0	0	0	0
I45FN50	0	0	0	0
I55CT	6	0	17	3
I55FN15	0	0	0	0
I55FN25	0	0	0	0
I55FN35	0	0	0	0
I55FN50	0	0	0	0
I65CT	9	2	13	11
I65FN15	6	0	9	0
I65FN25	0	0	11	0
I65FN35	0	0	1	0
I65FN50	0	0	3	0

การเปรียบเทียบปริมาณสนิมเหล็กโดยการนับพื้นที่การเกิดสนิม และการใช้ภาพถ่ายของแท่งเหล็กที่เกิดสนิมเป็นข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ผล ทำให้เห็นแนวโน้มการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับการซึมผ่านของคลอไรด์ นั่นคือ สนิมจะเกิดขึ้นบนเหล็กที่ฝังอยู่ในคอนกรีตควบคุมมากกว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน และเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินเพิ่มขึ้น ปริมาณสนิมก็มีแนวโน้มที่จะเกิดน้อยลง ซึ่งในขั้นตอนนี้ ข้อมูลการเกิดสนิมเหล็ก ยังไม่สามารถวิเคราะห์และเชื่อมโยงกับข้อมูลอื่นได้มากนัก จำเป็นต้องทำการเก็บข้อมูลในระยะยาวต่อไป

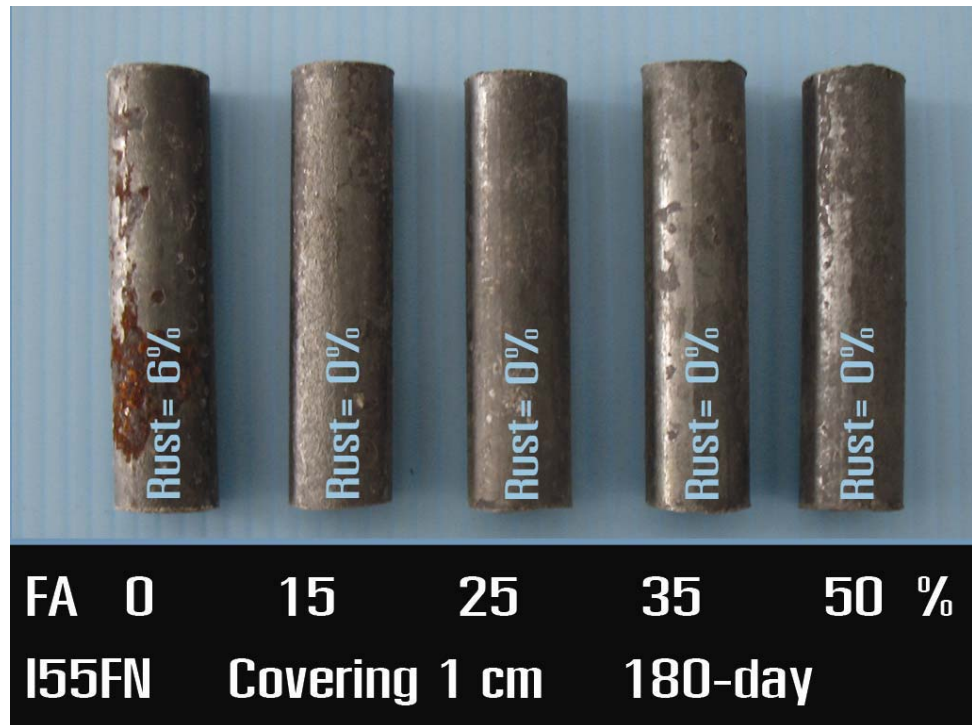


(ก) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 180 วัน

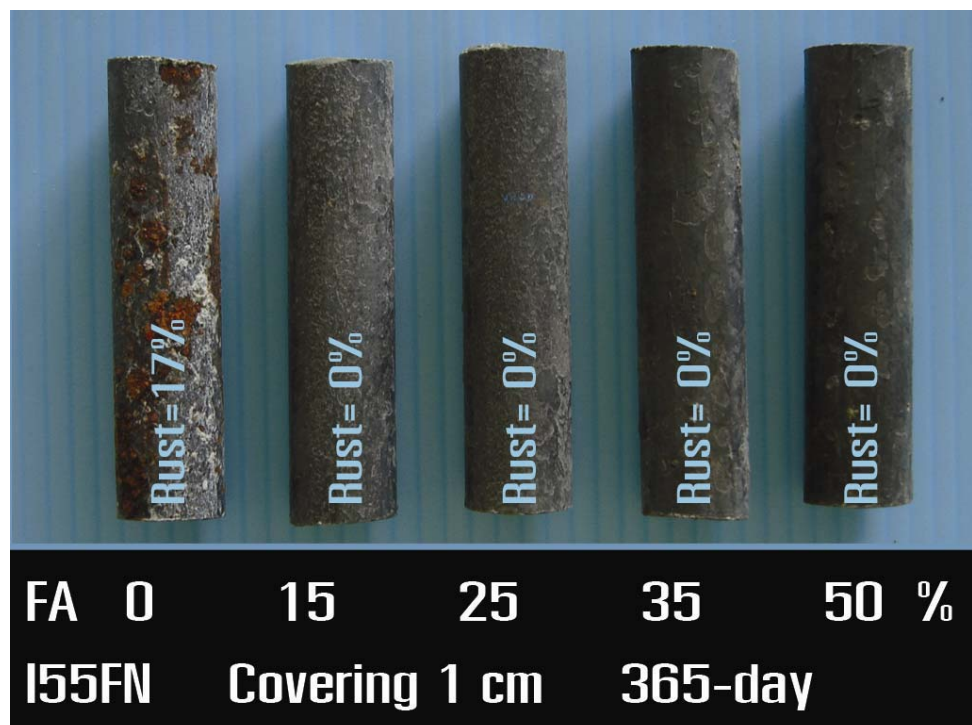


(ข) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 365 วัน

รูปที่ 4.26 ลักษณะการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. W/B ratio = 0.45 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 1 ซม.

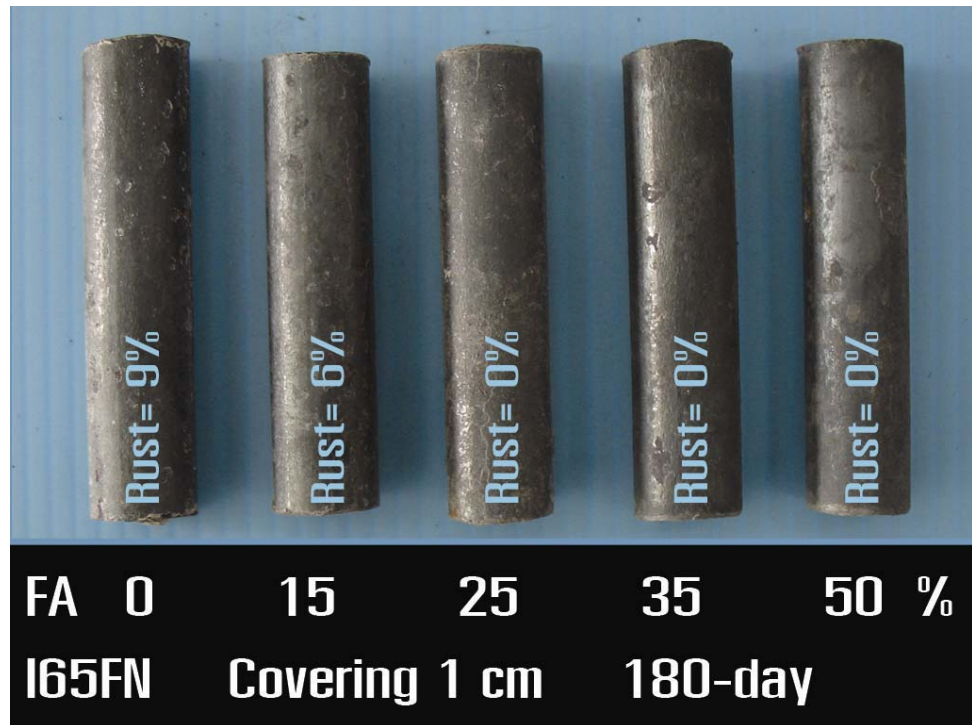


(ก) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 180 วัน

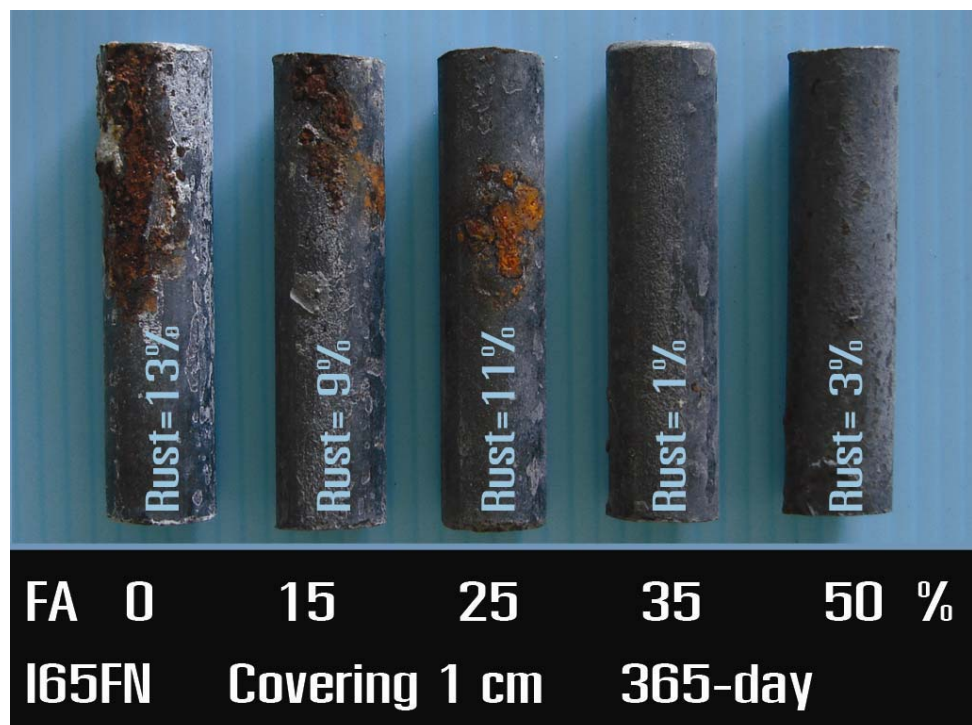


(ข) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 365 วัน

รูปที่ 4.27 ลักษณะการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. W/B ratio = 0.55 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 1 ซม.

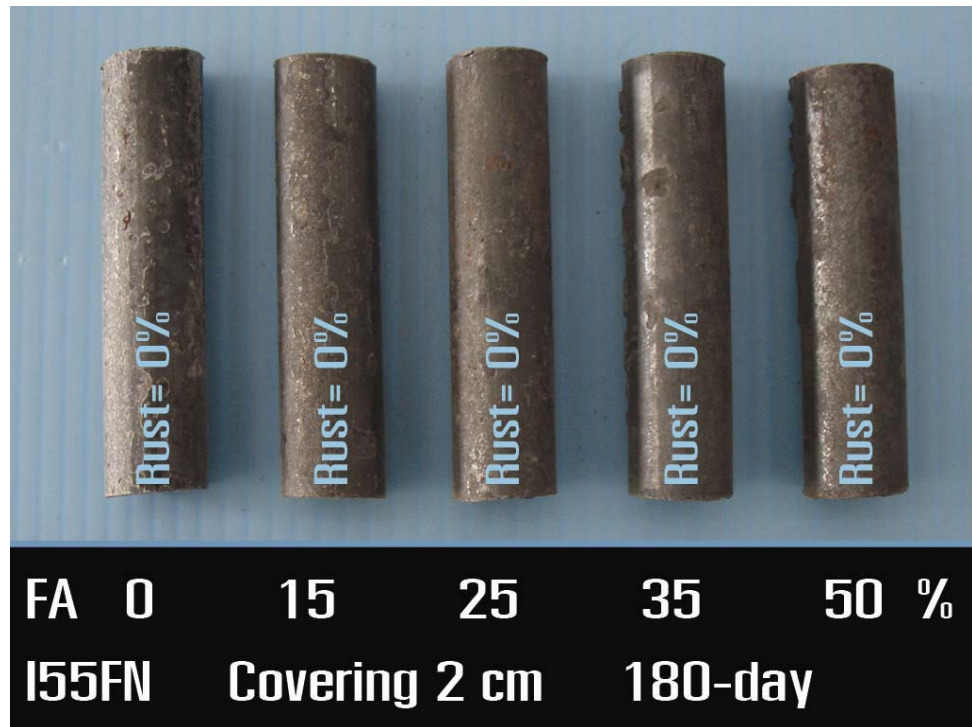


(ก) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 180 วัน

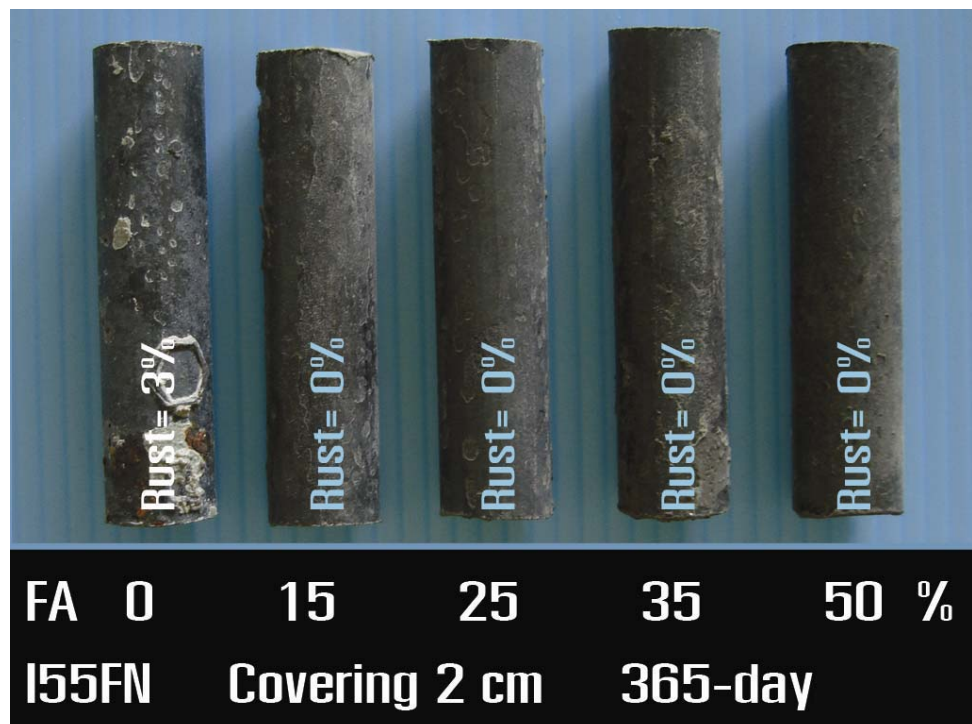


(ข) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 365 วัน

รูปที่ 4.28 ลักษณะการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. W/B ratio = 0.65 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 1 ซม.

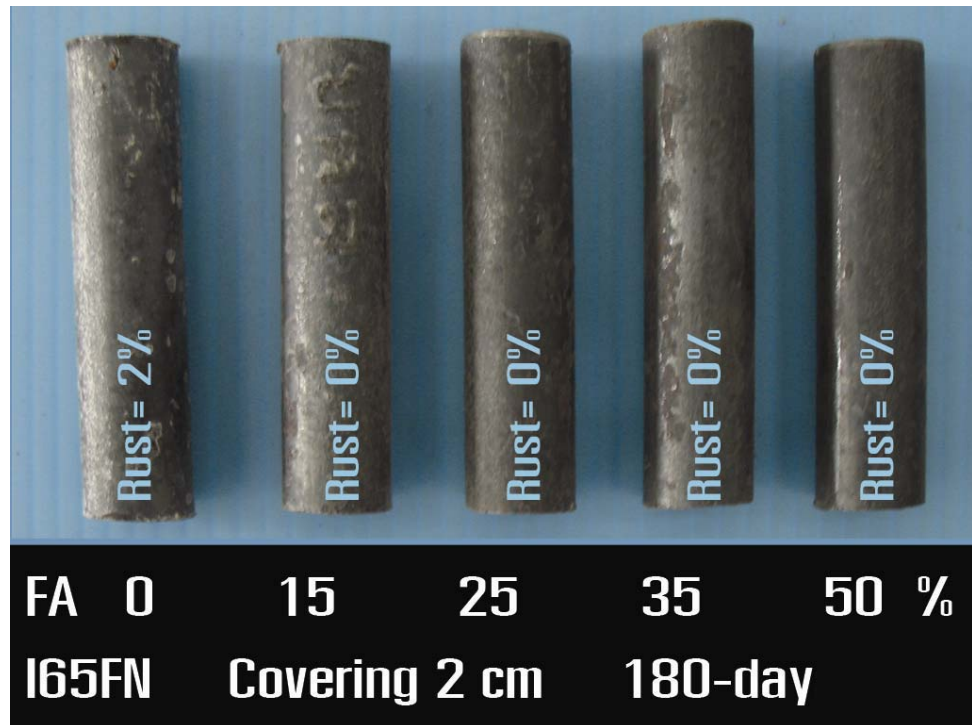


(ก) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 180 วัน

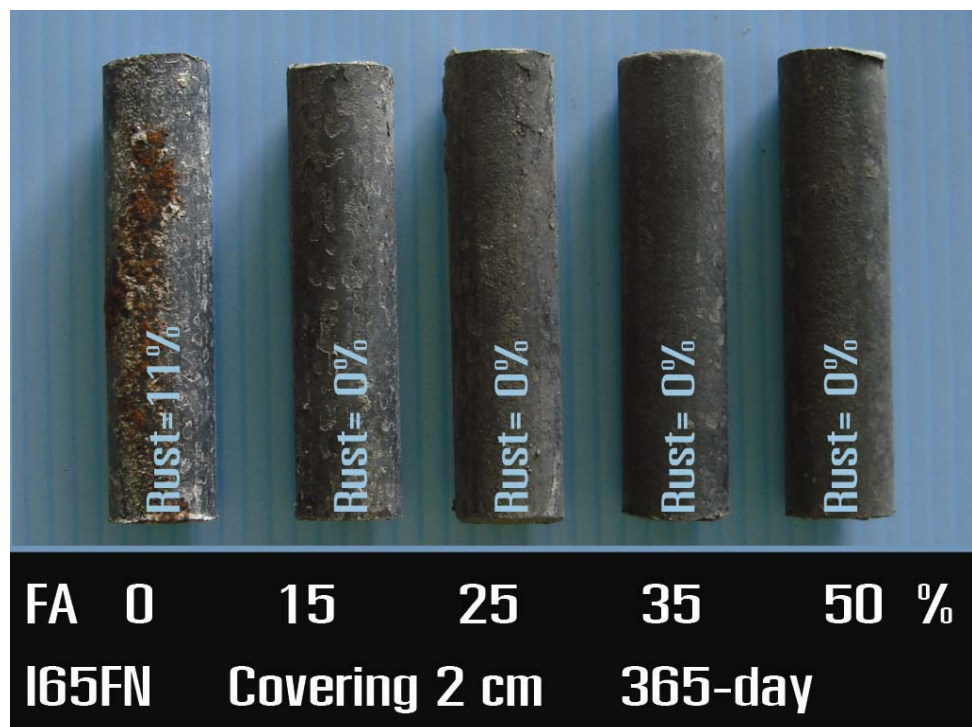


(ข) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 365 วัน

รูปที่ 4.29 ลักษณะการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. W/B ratio = 0.55 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 2 ซม.



(ก) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 180 วัน



(ข) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 365 วัน

รูปที่ 4.30 ลักษณะการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. W/B ratio = 0.65 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 2 ซม.

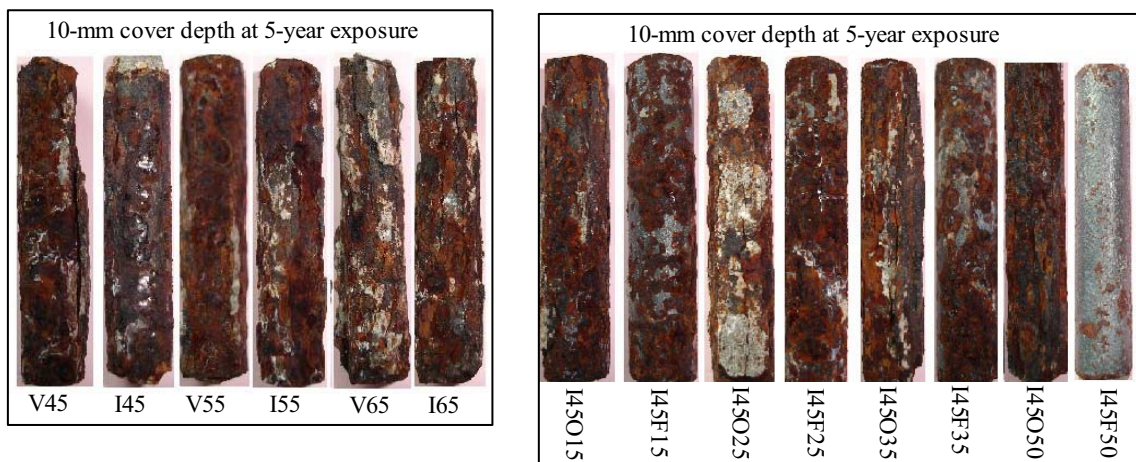
4.7.2 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

ตารางที่ 4.9 แสดงร้อยละของพื้นที่ที่เกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตทุกสัดส่วนผสมที่ระยะหุ้มต่างๆ ซึ่งเห็นได้ว่าแนวโน้มการเกิดสนิมเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณคลอไรด์ที่ได้วิเคราะห์ไปแล้ว กล่าวคือ การใช้เถ้าถ่านหินในคอนกรีตในปริมาณการแทนที่สูงขึ้น และค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลงสามารถลดการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ดีขึ้น เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนิมเหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างอายุ เช่นน้ำทะเล 4 ปี และ 5 ปี พบว่า โดยส่วนใหญ่แล้ว สนิมเหล็กที่อายุ 5 ปี เกิดเพิ่มขึ้นจากอายุการแช่ 4 ปี ค่อนข้างมาก โดยเฉพาะในกลุ่มของคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และ 0.65 พบว่าการเกิดสนิมที่อายุ 5 ปี เข้าไปถึงระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 75 มม. ค่อนข้างมาก ทั้งๆที่ที่อายุ 4 ปี คอนกรีตกลุ่มดังกล่าวนี้มีสนิมเหล็กเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (ประมาณร้อยละ 3-4) แต่พอระยะเวลาแช่เพิ่มขึ้นแค่ 1 ปี กลับพบว่าสนิมเหล็กเพิ่มขึ้นค่อนข้างสูง นั้นแสดงให้เห็นว่า เมื่อเหล็กเสริมในคอนกรีต เริ่มมีการเกิดสนิมถึงแม้เพียงเล็กน้อย แต่ใช้เวลาไม่นานมากนัก การทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลก็จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น คอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 มีปริมาณสนิมเหล็กที่ระยะหุ้มเหล็ก 75 มม. เท่ากับ ร้อยละ 60 (เพิ่มจากร้อยละ 4 ที่อายุ 4 ปี) แต่ทั้งนี้ในคอนกรีตกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหิน จะมีอัตราการเกิดสนิมเหล็กช้ากว่ากลุ่มที่ไม่ได้ใช้เถ้าถ่านหินค่อนข้างชัดเจน เช่น ที่ระดับความลึก 50 มม. คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 มีร้อยละของสนิมเหล็กเช่นน้ำทะเล 4 ปี เท่ากับ ร้อยละ 80 (เพิ่มจากร้อยละ 11 ที่อายุ 4 ปี) ในขณะที่คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกับที่แทนที่เถ้าถ่านหินไม่แยกขนาด ร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 มีการเกิดสนิมเหล็กเพียงร้อยละ 23, 4, 2 และ 0 ตามลำดับ และแนวโน้มเช่นเดียวกันนี้พบในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานอื่นๆ ด้วย นอกจากนั้นยังพบว่าคอนกรีตทุกกลุ่มที่มีการใช้เถ้าถ่านหิน การเกิดสนิมเหล็กจะเข้าถึงเพียงเล็กน้อยที่ระดับ 50 มม. เท่านั้น ส่วนกลุ่มที่ไม่ได้แทนที่เถ้าถ่านหินทั้งในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ที่ความลึกดังกล่าว มีการเกิดสนิมเหล็กเกิดขึ้นเกือบร้อยละร้อย และการทำลายของคลอไรด์ ได้เข้าไปถึงที่ระดับความลึก 75 มม. ในขณะที่กลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินมีน้อยหรือยังไม่พบการทำลายเหล็กเสริมที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 75 มม.

ในการศึกษาครั้งนี้ ที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10 มม. ทุกส่วนผสมมีการเกิดสนิมเหล็กถึงร้อยละร้อยเมื่อเช่นน้ำทะเลถึงอายุ 5 ปี ยกเว้นคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินที่ผ่านการคัดแยกขนาด ร้อยละ 50 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่มีสนิมเหล็กเกิดขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.31 นั้นแสดงให้เห็นว่าที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10 มม. ไม่สามารถวิเคราะห์ถึงความแตกต่างของการเกิดสนิมเหล็กระหว่างส่วนผสมต่างๆได้ เมื่อพิจารณาลักษณะการเกิดสนิมเหล็กของคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน ที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20, 50, และ 75 มม. ตามรูปที่ 4.32 พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อ

วัสดุประสาน 0.55 และ 0.65 มีสนิมเหล็กเกิดขึ้นค่อนข้างมาก และเข้าไปถึงที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 75 มม. ส่วนคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 การเกิดสนิมยังเข้าไปไม่ถึงที่ระดับความลึก 75 มม. และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I เกิดขึ้นใกล้เคียงกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V

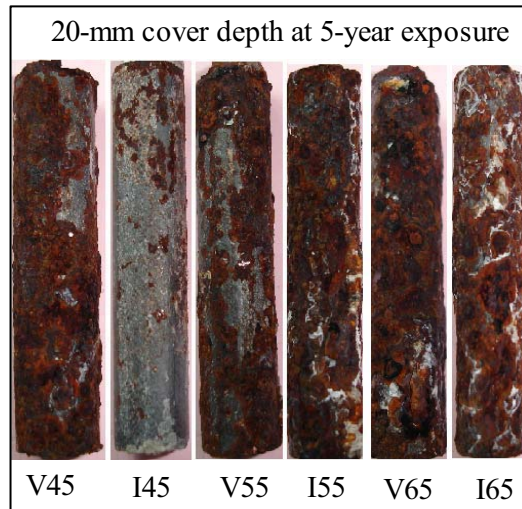
รูปที่ 4.33 แสดงลักษณะเหล็กที่ฝังในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 เปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 พบว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่แยกขนาด ถึงแม้จะมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงถึง 0.65 ก็ยังส่งผลดีต่อการป้องกันการเกิดสนิมได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตกลุ่มที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และเห็นผลชัดเจนที่ระยะความลึกจากผิวหน้าคอนกรีตมากขึ้น ส่วนรูปที่ 4.34 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการใช้เถ้าถ่านหินที่ไม่ผ่านการคัดแยกขนาดกับเถ้าถ่านหินที่ผ่านการคัดแยกขนาดละเอียดต่อการเกิดสนิมเหล็กที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม. เป็นที่น่าสังเกตว่า การใช้เถ้าถ่านหินที่แยกขนาดละเอียดให้ผลดีต่อการต้านทานการเกิดสนิมในเหล็กเสริมแตกต่างจากกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินโดยตรงไม่มากนัก นั้นแสดงให้เห็นว่าเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ สามารถนำมาใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลได้ โดยไม่จำเป็นต้องนำมาคัดแยกขนาดให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้ต้องดูคุณสมบัติด้านอื่นควบคู่ไปด้วย และขนาดกลางของอนุภาคเถ้าถ่านหินที่นำมาใช้ไม่ควรที่จะเกิน 30 ไมโครเมตร



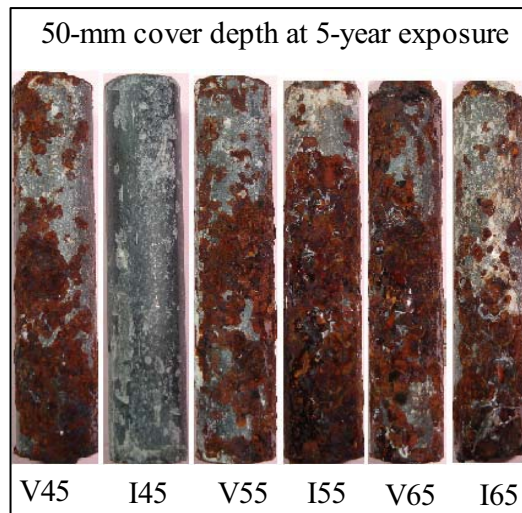
รูปที่ 4.31 เหล็กที่ฝังในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ที่มี W/B ratio เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 กับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ที่มี W/B ratio เท่ากับ 0.45 ที่ระยะหุ้ม 10 มม. เมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ตารางที่ 4.9 พื้นที่ผิวเหล็กที่เกิดสนิมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

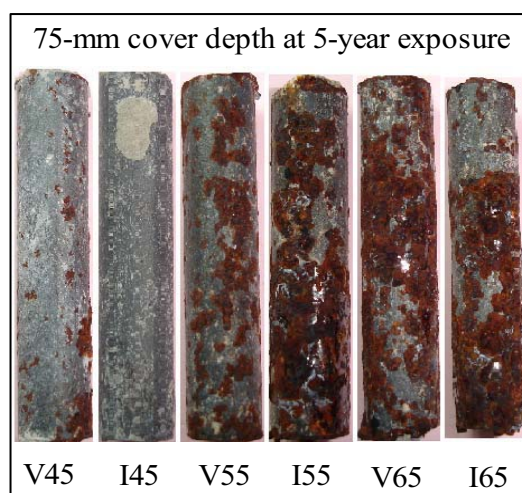
Type of concrete	Rusted area of the embedded steel (%)							
	4-year exposure				5-year exposure			
	10 mm	20 mm	50 mm	75 mm	10 mm	20 mm	50 mm	75 mm
I45	100	45	2	0	100	65	4	0
V45	78	49	2	0	100	90	45	7
I45O15	23	13	0	0	100	20	2	0
I45O25	35	5	0	0	100	30	2	0
I45O35	36	10	0	0	100	7	0	0
I45O50	56	4	0	0	100	5	0	0
I45F15	100	4	0	0	93	30	2	0
I45F25	90	1	0	0	100	35	0	0
I45F35	38	0	0	0	87	13	2	0
I45F50	0	0	0	0	7	2	0	0
I55	100	77	11	3	100	100	70	57
V55	100	50	13	2	100	95	73	48
I55O15	100	15	0	0	100	95	5	0
I55O25	100	10	0	0	100	100	7	0
I55O35	100	9	0	0	100	56	2	0
I55O50	100	13	0	0	100	14	2	0
I55F15	100	21	0	0	100	60	3	0
I55F25	88	4	0	0	100	100	15	5
I55F35	98	3	0	0	100	13	3	1
I55F50	3	0	0	0	100	10	2	0
I65	100	85	11	4	100	100	80	60
V65	100	96	19	6	100	100	85	73
I65O15	100	83	6	0	100	100	23	0
I65O25	100	87	0	0	100	95	4	0
I65O35	100	42	1	0	100	93	2	0
I65O50	88	8	0	0	100	25	0	0
I65F15	100	94	1	0	100	65	2	0
I65F25	98	30	0	0	100	84	5	2
I65F35	100	16	0	0	100	78	5	0
I65F50	21	1	0	0	100	15	0	0



(ก) ระยะหุ้มคอนกรีต 20 มม.

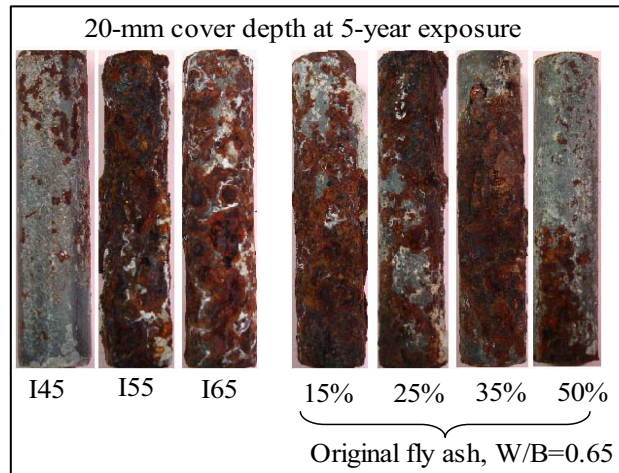


(ข) ระยะหุ้มคอนกรีต 50 มม.

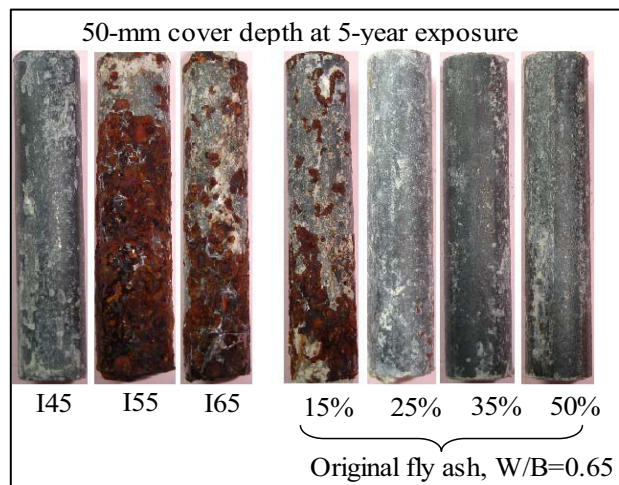


(ค) ระยะหุ้มคอนกรีต 75 มม.

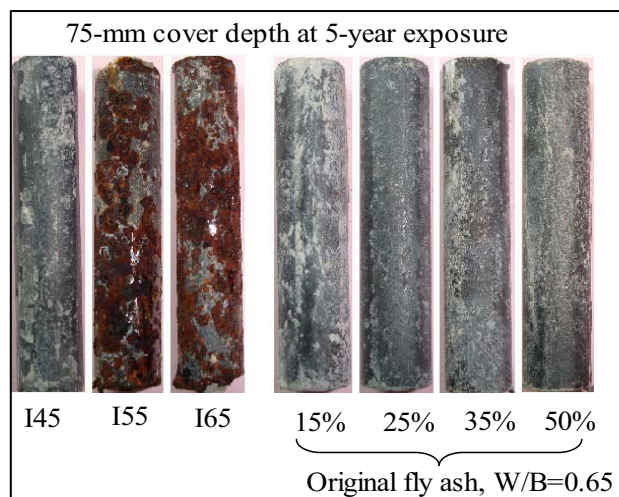
รูปที่ 4.32 เหล็กที่ฝังในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V เมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี



(ก) ระยะหุ้มคอนกรีต 20 มม.

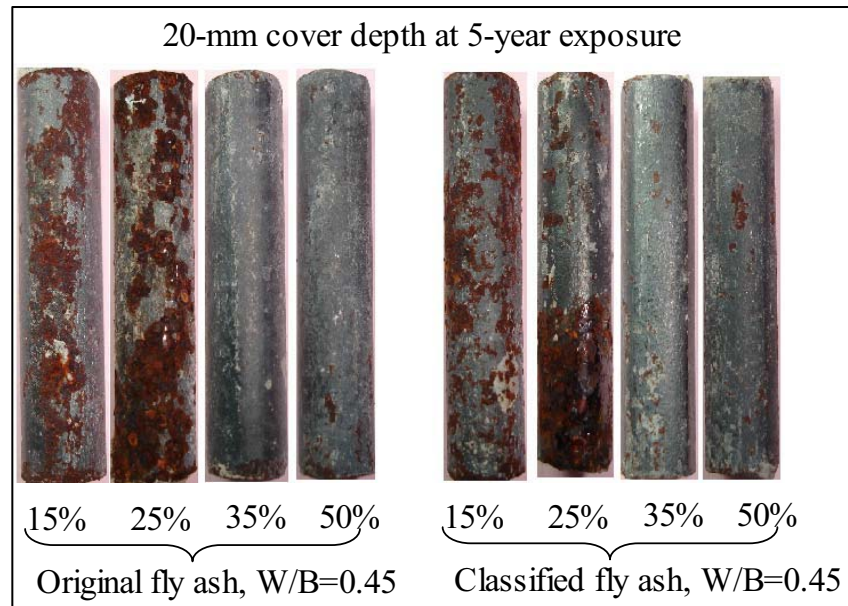


(ข) ระยะหุ้มคอนกรีต 50 มม.

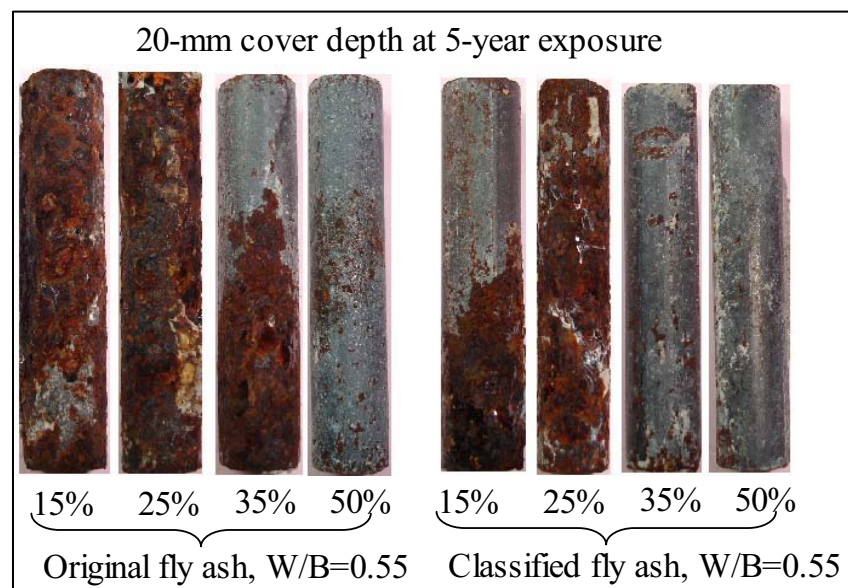


(ค) ระยะหุ้มคอนกรีต 75 มม.

รูปที่ 4.33 เหล็กที่ฝังในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ที่มี W/B ratio เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 กับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่มี W/B ratio เท่ากับ 0.65



(ก) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.45



(ข) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.55

รูปที่ 4.34 เหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ผ่านการคัดแยกขนาด และไม่ผ่านการคัดแยกขนาด เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

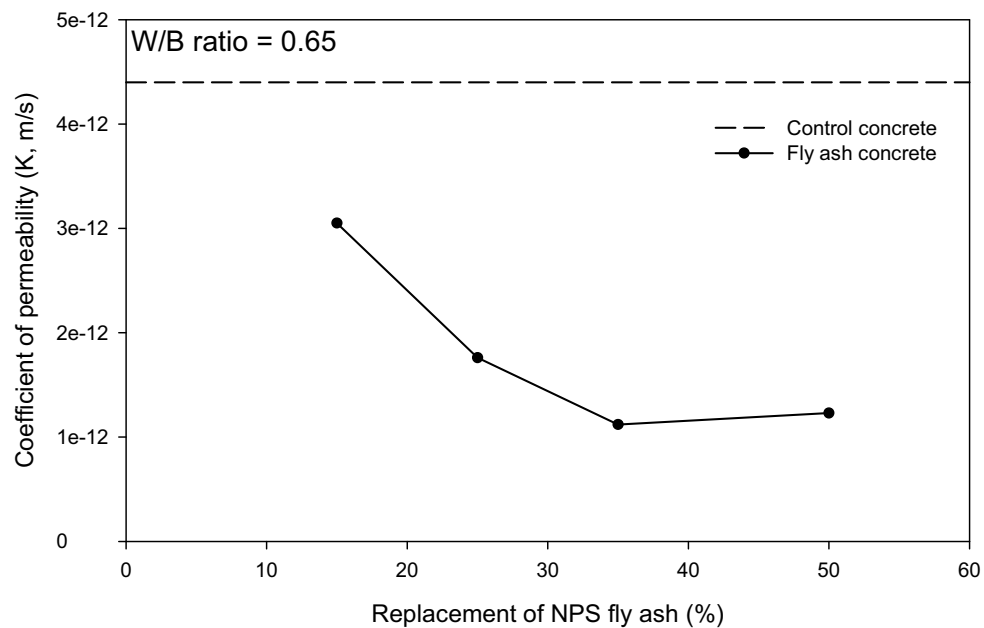
4.8 การทดสอบการซึมผ่านคอนกรีต

4.8.1 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ที่บดละเอียดจนมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 2.0

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ซึ่งมีอัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 หลังจากแช่น้ำทะเล 365 วัน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 4.35 ยกเว้นคอนกรีต I65FN50 มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูงกว่าคอนกรีต I65FN35 เพียงเล็กน้อย ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านดังกล่าวมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการซึมผ่านของคลอไรด์ แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานจากเถ้าถ่านหินช่วยทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น เป็นผลให้สารเคมีต่างๆ ที่อยู่ในน้ำทะเลแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ยาก ขณะที่การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตในน้ำทะเลยังไม่ส่งผลต่อคอนกรีต ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตมีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องเก็บข้อมูลในระยะยาวต่อไป เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของน้ำทะเลที่มีต่อการซึมผ่านคอนกรีต

ตารางที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส.
ที่แช่น้ำทะเล 365 วัน

Type of concrete	Coefficient of permeability (K, m/s)
I65CT	4.40×10^{-12}
I65FN15	3.05×10^{-12}
I65FN25	1.76×10^{-12}
I65FN35	1.12×10^{-12}
I65FN50	1.23×10^{-12}



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเอ็น. พี. เอส. ที่แช่น้ำทะเล 365 วัน

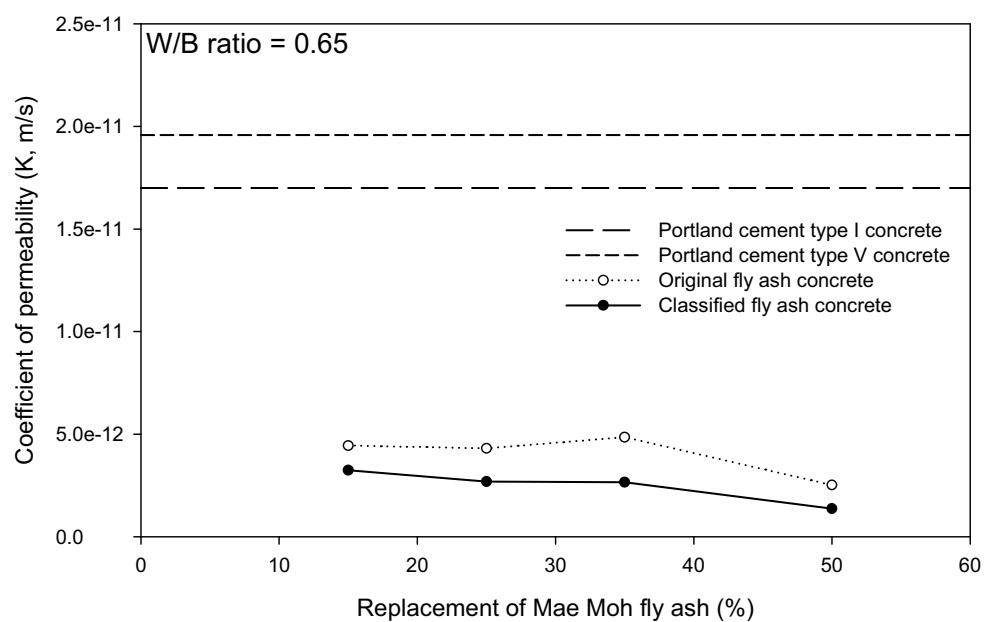
4.8.2 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทั้งที่ผ่านการแยกขนาดละเอียด และไม่แยกขนาด ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี แสดงผลดังตารางที่ 4.11 พบว่าโดยภาพรวมแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการซึมผ่านของคลอไรด์ กล่าวคือ คอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินทั้งที่แยกขนาดและไม่แยกขนาดให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำกว่ากลุ่มที่ไม่ได้แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน และการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นและละเอียดขึ้นสามารถลดการซึมผ่านของน้ำลงได้ นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่าใกล้เคียงกัน โดยคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเท่ากับ 1.70×10^{-11} และ 1.96×10^{-11} เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ค่าการซึมผ่านคอนกรีตธรรมดาจะขึ้นอยู่กับค่ากำลังอัดของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่มีกำลังสูงจะมีค่าการซึมผ่านลดลงเนื่องจากคอนกรีตที่บด ทำให้ น้ำซึมผ่านได้ยากขึ้น ทั้งนี้แนวโน้มแบบนี้จะใช้ไม่ได้กับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เนื่องจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน มีผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานและการอุดแทรกช่องว่างของอนุภาคเถ้าถ่านหินที่ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น และลดการซึมผ่านลงได้ ดังนั้นในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินถึงแม้กำลังอัดจะสูงไม่ได้หมายถึงคุณสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านคอนกรีตจะดีไปด้วย รูปที่ 4.36 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะทั้งที่แยก และไม่ได้ออกขนาด จะเห็นว่า ความละเอียดของเถ้าถ่านหินมีผลต่อ

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านค่อนข้างชัดเจน โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินละเอียดกว่าจะมีการซึมน้ำผ่านยากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

ตารางที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ที่แช่น้ำทะเล 5 ปี

Type of concrete	Coefficient of permeability (K, m/s)
I65	17.00×10^{-12}
V65	19.58×10^{-12}
I65O15	4.44×10^{-12}
I65O25	4.31×10^{-12}
I65O35	4.85×10^{-12}
I65O50	2.52×10^{-12}
I65F15	3.24×10^{-12}
I65F25	2.69×10^{-12}
I65F35	2.66×10^{-12}
I65F50	1.37×10^{-12}



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ที่แช่น้ำทะเล 5 ปี

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาตลอดงานวิจัยนี้ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ที่บดละเอียดจนมีน้ำหนักด่างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 2.0

5.1.1.1 คอนกรีตทุกส่วนผสมสามารถพัฒนากำลังอัดจากอายุ 28 วัน ได้ดี แม้จะแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน หลังจากนั้นกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยหรือเกือบคงที่

5.1.1.2 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งเป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสม (ไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) ช่วยให้การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดียิ่งขึ้น

5.1.1.3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและระยะหุ้มคอนกรีตยังคงเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการป้องกันเหล็กที่ฝังในคอนกรีตไม่ให้เกิดสนิม โดยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำและมีระยะหุ้มคอนกรีตที่มากพอ สามารถป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ดี

5.1.1.4 ปริมาณเถ้าถ่านหินที่ผสมในคอนกรีตมีอิทธิพลต่อการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์มากกว่าค่ากำลังอัดที่ใช้ในการออกแบบปฏิภาคส่วนผสม

5.1.2 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

5.1.2.1 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกสัดส่วนผสมมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 28 วัน ถึง 5 ปี ที่แช่ในน้ำทะเล ในขณะที่คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีแนวโน้มของกำลังอัดลดลงเล็กน้อย

5.1.2.2 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีแนวโน้มต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในสภาพแวดล้อมทะเลไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อทดสอบจนถึงอายุการแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

- 5.1.2.3** คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ด้วยเถ้าถ่านหินทุกสัดส่วนผสม (ไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) สามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V และการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้นพบว่า การซึมผ่านของคลอไรด์จากน้ำทะเลจะลดลง
- 5.1.2.4** ที่อัตราส่วนการแทนที่เถ้าถ่านหินที่เท่ากัน พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดมากกว่ามีกำลังอัดสูงกว่า และสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์จากน้ำทะเลได้ดีกว่า และเกิดสนิมเหล็กน้อยกว่าคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินจากโรงงานโดยตรง
- 5.1.2.5** เมื่อแช่ในน้ำทะเล 5 ปี คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ด้วยเถ้าถ่านหิน มีการกัดกร่อนเหล็กเสริมคอนกรีตที่ระยะของคอนกรีตหุ้มเหล็กหนา 75 มม. น้อยมากหรือแทบไม่มีเลย ในขณะที่คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีการกัดกร่อนเกิดขึ้นที่ระดับนี้ชัดเจน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1** ควรดำเนินการเก็บข้อมูลการกัดกร่อนคอนกรีตเนื่องจากน้ำทะเล ให้ได้ตามแผนงานที่วางไว้ในระยะยาว ซึ่งต้องดำเนินการอย่างต่อเนื่องและเป็นระบบ เพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความสมบูรณ์ และสามารถนำไปเป็นฐานข้อมูลที่ใช้งานได้จริง
- 5.2.2** คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเหมาะสำหรับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยเลือกใช้เถ้าถ่านหินที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพให้มีความละเอียดสูง นอกจากนี้ คอนกรีตควรมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำและมีระยะหุ้มเหล็กที่มากพอ
- 5.2.3** เมื่อดำเนินการเก็บข้อมูลได้ครบถ้วน ควรทำการเปรียบเทียบเถ้าถ่านหินจากทั้งสองแหล่งผลิตที่ส่งผลต่อการป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเล
- 5.2.4** ควรเก็บตัวอย่างน้ำทะเลจากชายฝั่งทะเลอันดามัน และพื้นที่ชายฝั่งทะเลอื่นๆ ในประเทศไทย เพื่อเป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับน้ำทะเลชายฝั่งอ่าวไทย ที่ทำการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในงานวิจัยนี้
- 5.2.5** ควรมีการศึกษาถึงการนำวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นมาใช้ในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเล เช่น เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าขานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

ไกรวุฒิ เกียรติโกมล และคณะ, 2539, “การคัดเลือกเถาถ่านหินที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีต”, การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2539 สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 15-18 สิงหาคม, กรุงเทพมหานคร, หน้า 257-269.

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ, 2545, การกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกต่อมอร์ตาร์ และผลกระทบของน้ำทะเลต่อระยะหุ้มคอนกรีตที่ผสมเถ้าลิกไนต์แม่เมาะ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 52-73, 75.

ณรงค์ชัย วิวัฒนาช่วง และคณะ, 2542, “บทบาทของเถาถ่านหินที่แยกละเอียด 5 ชนิด ต่อกำลังอัดของคอนกรีต”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5, 24-26 มีนาคม, ชลบุรี, หน้า 108-115.

ปริญญญา จินดาประเสริฐ และอุกฤษฏ์ ไชศรี, 2548, “กำลังรับแรงและความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบ”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม, ชลบุรี, หน้า MAT 44-48.

มณฑะเกียรติ ชินวาทิช และคณะ, 2548, “ผลกระทบของน้ำทะเลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม, ชลบุรี, หน้า MAT 49-54.

เรืองรุชดี ชีระโรจน์ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2543, “การพัฒนาเถาถ่านหินที่ทิ้งแล้วเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน”, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 11, ฉบับที่ 4, หน้า 10-21.

วัชรระ เพิ่มชาติ และสมพร ธเนศวรวิชย์, 2544, “การเผาไหม้ในระบบฟลูอิดไดซ์เบด”, วารสารประสิทธิภาพพลังงาน, ปีที่ 11, ฉบับที่ 55, หน้า 32-34.

วิเชียร ชาติ, 2546, กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะเมื่อแช่น้ำทะเลและน้ำเสียชุมชน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 46-50.

สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา, 2537, การศึกษาคุณภาพน้ำบริเวณชายฝั่งทะเล ตะวันออก, มิถุนายน, หน้า 55.

สมิตร ส่งพิริยะกิจ, 2538, ผลกระทบของความละเอียดจากการบดและการแยกแ้วผ่านหินแม่มาต่อ คุณสมบัติของมอร์ตาร์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 22-74.

สุรพล พฤษานุกูล, 2546, “กรรมวิธีการผลิตและชนิดของแ้วผ่านหินที่มีในประเทศไทย”, เอกสารประกอบการสัมมนาวิชาการเรื่องการนำแ้วผ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในการงานคอนกรีต, 29 เมษายน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 19-29.

Al-Amoudi, O.S.B., et al., 1993, “Prediction of long-term corrosion resistance of plain and blended cement concretes”, **Journal of the American Concrete Institute**, Vol. 90, No. 6, pp. 564-571.

Al-Hussaini, M.J., et al., 1990, “The effect of chloride ion source on the free chloride ion percentages of OPC mortars”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, No. 5, pp. 739-745.

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.

Bakker, R.F.M., 1988, **Corrosion of Steel in Concrete**, Chapman and Hall, London, pp. 22-55.

Byfors, K., 1987, “Influence of silica fume and fly ash on chloride diffusion and pH values in cement paste”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 17, No. 1, pp. 115-130.

Chalee, W., et al., 2006, “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.

Chindaprasirt, P., et al., 2007, “Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete”, **Construction and Building Materials**, Vol. 21, No. 2, pp. 356-361.

Comite Euro-International Du Beton (CEB), 1992, **Durable Concrete Structures** (Design Guide), Thomas Telford Ltd., Great Britain, pp. 79-83.

Detwiler, R.J., Kjellsen, K.O. and Gjorv, O.E., 1991, "Resistance to chloride intrusion of concrete cured at different temperatures", **Journal of the American Concrete Institute**, Vol. 88, No. 1, pp. 19-24.

Ellis, W.E., Jr., Rigg, E.H. and Butler, W.B., 1991, "Comparative results of utilization of fly ash, silica fume and GGBFS in reducing the chloride permeability of concrete", **The 2nd International Conference of Durability of Concrete**, August 4-9, Montreal, Canada, pp. 443-458.

Fraay, A.L.A., Bijen, J.M. and Haan, Y.M.D., 1989, "The reaction of fly ash in concrete. A critical examination", **Cement and Concrete Research**, Vol. 19, No. 2, pp. 235-246.

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.

Glass, G.K. and Buenfeld, N.R., 1997, "The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete", **Corrosion Science**, Vol. 39, No. 5, pp. 1001-1013.

Goktepe, A.B., et al., 2006, "Estimation of sulfate expansion level of PC mortar using statistical and neural approaches", **Construction and Building Materials**, Vol. 20, No. 7, pp. 441-449.

Hansen, T.C., 1990, "Long-term strength of high fly ash concretes", **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, No. 2, pp. 193-196.

Harrison, W.H., 1990, "Effect of chloride in mix ingredients on sulphate resistance of concrete", **Magazine of Concrete Research**, Vol. 42, No. 152, pp. 113-126.

Hewlett, P.C., 1998, **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, 4th ed., Arnold, New York, p. 584.

Hoff, G.C., 1991, "Durability of offshore and marine concrete structures", **The 2nd International Conference of Durability of Concrete**, August 4-9, Montreal, Canada, pp. 33-64.

Lambert, P., Page, C.L. and Vassie, P.R.W., 1991, "Investigations of reinforcement corrosion. 2. Electrochemical monitoring of steel in chloride-contaminated concrete", **Materials and Structures**, Vol. 24, No. 143, pp. 351-358.

Lea, F.M., 1970, **The Chemistry of Cement and Concrete**, Great Britain, Edward Arnold, pp. 361-371.

Mather, B., 1966, "Effect of Seawater on concrete", **Highway Research Record**, No. 113, pp. 33-42.

Monteiro, P.J.M. and Kurtis, K.E., 2003, "Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack", **Cement and Concrete Research**, Vol. 33, No. 7, pp. 987-993.

Mora, E.P., Paya, J. and Monzo, J., 1993, "Influence of different sized fractions of a fly ash on workability of mortars", **Cement and Concrete Research**, Vol. 23, No. 4, pp. 917-924.

Neville, A.M., 1996, **Properties of Concrete**, 4th ed., Longman, Malaysia, pp. 563-575.

Nireki, T. and Kabeya, H., 1987, "Monitoring and analysis of seawater salt content", **The 4th International Conference on Durability of Building Materials and Structures**, November 4-6, Singapore, pp.531-536.

Rasheeduzzafar, Ehtesham Hussain, S. and Al-Saadoun, S.S., 1991, "Effect of cement composition on chloride binding and corrosion of reinforcing steel in concrete", **Cement and Concrete Research**, Vol.21, No. 5, pp. 777-794.

Santhanam, M., Cohen, M.D. and Olek, J., 2003, "Mechanism of sulfate attack: a fresh look Part 2. Proposed mechanisms", **Cement and Concrete Research**, Vol. 33, No. 3, pp. 341-346.

Schiessl, P. and Raupach, N., 1989, "Influence of blending agents on the rate of corrosion of steel in concrete", **Durability of Concrete : Aspects of Admixtures and Industrial By-products**, The 2nd International Seminar, June, Swedish Council for Building Research, pp. 205-214.

Tang, L. and Nilsson, L.-O., 1993, "Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars", **Cement and Concrete Research**, Vol. 23, No. 2, pp. 247-253.

Thomas, M., 1996, "Chloride thresholds in marine concrete", **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, No. 4, pp. 513-519.

Thomas, M.D.A. and Matthews, J.D., 2004, "Performance of pfa concrete in a marine environment – 10-year results", **Cement and Concrete Composites**, Vol. 26, No. 1, pp. 5-20.

Tritthart, J., 1989, "Concrete binding in cement. II. The influence of the hydroxide concentration in the pore solution of hardened cement paste on chloride binding", **Cement and Concrete Research**, Vol. 19, No. 5, pp. 683-691.

Virmani, Y.P., 1982, "Cost effective rigid concrete construction and rehabilitation in adverse environments", **Annual Progress Report**, U.S. Federal Highway Administration, p. 68.

ภาคผนวก

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

MATERIALS, EXPERIMENTATION, MAINTENANCE AND REHABILITATION

PROCEEDINGS OF

**The Tenth East Asia-Pacific Conference
on Structural Engineering & Construction
(EASEC-10)**

Bangkok, Thailand

Edited by

Worsak Kanok-Nukulchai

Sunil Munasinghe

Naveed Anwar

CHLORIDE PENETRATION PROFILE AND STEEL CORROSION IN FLY ASH CONCRETE UNDER 4-YEAR EXPOSURE IN MARINE ENVIRONMENT OF THAILAND

Wichian Chalee¹, Monthien Teekavanit² and Chai Jaturapitakkul³

ABSTRACT : In this study, chloride penetration profile and steel corrosion of fly ash concrete with various covering depths under marine environment are investigated. Control concretes were designed by using Portland cement type I and V with W/B ratios of 0.65, 0.55, and 0.45. Fly ash concretes with W/B ratio of 0.65 were cast by using original and classified fly ashes to replace Portland cement type I at percentages of 15, 25, 35, and 50% by weight of cementitious material. Concrete specimens with steel bar of 12-mm in diameter and 50-mm in length embedded at coverings of 10, 20, 50, and 75 mm were cast. The specimens were cured in fresh water for 28 days and then were exposed to tidal zone of marine environment in the gulf of Thailand. The specimens were tested for the chloride penetration profile and corrosion of embedded steel after being exposed to tidal zone for 4 years. The results showed that concretes mixed with Portland cement type I tend to have lower chloride penetration profile than those of Portland cement type V. The increase of fly ash replacement in concrete reduced the chloride penetration profile. The concrete with classified fly ash gave a good result in lowering chloride penetration profile when comparing to concrete with original fly ash. Interestingly, the steel bar with 20-mm covering depth and 50% of classified fly ash concrete had less corrosion than that of 75-mm covering depth of concretes mixed with Portland cement type I and V. This result suggested that the use of fly ash in concrete up to 50% could reduce the concrete covering from 75 mm to 20 mm for protecting steel bar in marine environment at 4-year exposure.

KEYWORDS: Fly Ash, Marine environment, Chloride penetration, Corrosion, Covering depth.

1 INTRODUCTION

At present, concrete is widely used in marine structure and acknowledged that the destroying of concrete structure is mainly due to sulfate attack and the corrosion of steel under chloride attack. However, all of these mechanisms are combination of many influences, such as moisture, temperature, impacted force, abrasion by sand in seawater and so on [1]. There are various methods to prevent or reduce concrete from the attack of marine environment, each method has applied differently depending on economy and environment exposure. The prevention of seawater attack can perform by using fly ash to partly replace cement and leads to protect or reduce chloride ingress. Several studies had been reported that fly ash in concrete had achievable improvement in pore structure, permeability and strength, which clearly showed at increasing concrete durability [2-4]. However, concrete in marine environment needs to be studied chloride penetration profile and steel corroded in together leading to serve the serviceability life of building. Presently, many researchers have obtained the durability data of marine structure concrete in long term exposure [5-7]. However, less research studied in corrosion of fly ash concrete relating to fly

¹ Ph.D. Candidate, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand

² Graduate Student, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand

³ Associate Professor, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand

ash fineness, various coverings, corrosion of steel, and chloride penetration profile. Throughout, it has not been found the long term data on marine environment of South East Asia which is in a hot and high humidity climate. Therefore, the aim of this work is to present the effect of marine environment on original and classified fly ash concretes. Variables in this study include W/B ratio, fly ash fineness, fly ash content, and covering depth of concrete. Corrosion of embedded steel and chloride penetration profile of concretes were investigated at 4-year exposure. The objectives of this study were to investigate the amounts of fly ash replacement and the effects of original and classified fly ash on durability of concrete in marine environment.

2 EXPERIMENTAL PROGRAM

2.1 MATERIALS

Portland cement type I and V, fly ash obtained from Mae Moh power plant in Thailand, graded sand and crushed limestone with maximum size of 3/4" were used in this study. The original fly ash had the median particle size of 30.6 μm , and was then classified to have 9.7 μm median particle size by using air classifier. Portland cement type I and V had the median particle size of 25 and 19.2 μm , respectively. For chemical compositions, the sums of SiO_2 , Al_2O_3 , and Fe_2O_3 in original and classified fly ashes were 79.45 and 78.47%, respectively indicating the class F fly ash in accordance with ASTM C 618. It was also concluded that the chemical compositions of classified fly ash were not different from those of the original fly ash. In addition, Portland cement type I and V had C_3A content of 9.23 and 1.80%, respectively. It is noted that C_3A content of Portland cement type V are less than 5% as specified by ASTM C 150.

2.2 SPECIMENS AND TEST PROGRAM

In this study, 200-mm concrete cube specimens and 12-mm in diameter steel bar with 50-mm in length were prepared. Steel bars were embedded in concrete with coverings of 10, 20, 50, and 75 mm. Control concretes were designed by using Portland cement type I and V to have compressive strength about 30.0, 40.0 and 50.0 MPa or had W/B ratios of 0.65, 0.55, and 0.45, respectively. Fly ash concretes were cast by using original or classified fly ash to replace Portland cement type I at percentages of 15, 25, 35, and 50 by weight of binder for concrete with W/B of 0.65. A total of 14 mixture proportions of concretes are shown in Table 1. The concrete specimens were removed from the molds after casting for 1 day and then were cured in water for 27 days. After that, the specimens were transferred to the tidal zone of the marine site in Chonburi Province, Thailand. The range of annual temperature at this site is between 26 and 30°C, and the chemical analysis of seawater, chloride and sulfate compositions are ranging from 16,000 to 18,000 and 2,200 to 2,600 mg/l, respectively. Concretes were tested to determine the chloride penetration profile and corrosion of the embedded steel after being exposed to seawater in the wet-dry condition for 4 years.

2.3 DETERMINATION OF CHLORIDE PENETRATION PROFILE

Chloride tests were conducted to measure the chloride ingress at any depth of concrete. Concretes were dry-cored to obtain 50-mm diameter cylinders. The core sample was dry-cut from surface having 10-mm thickness, and then was ground into fine powder. Concrete powder of 10 g was needed for chloride tests by acid-soluble chloride method, resulted in the total chloride content in concrete, accordance to ASTM C1152 [8]. In addition, the chloride contents at the position of the embedded steel were also determined.

2.4 DETERMINATION OF CORROSION OF EMBEDDED STEEL BAR

After coring, the concrete was broken and the steel bars were removed from the concrete cube, and then were cleaned by brush. The corrosion of embedded steel bar were measured in term of the percentage of rusted area and image recording.

Table 1. Mixture proportions of concrete

Mix	Mixture Proportion of Concrete (kg/m ³)						
	Cement	Original Fly Ash (F)	Classified Fly Ash (F)	Fine Aggregate	Coarse Aggregate	Water	W/B
I45	478	-	-	639	1024	215	0.45
I55	478	-	-	639	971	262	0.55
I65	478	-	-	639	922	311	0.65
V45	478	-	-	639	1024	215	0.45
V55	478	-	-	639	971	262	0.55
V65	478	-	-	639	922	311	0.65
I65O1	406	72	-	639	898	311	0.65
I65O2	359	119	-	639	881	311	0.65
I65O3	311	167	-	639	864	311	0.65
I65O5	239	239	-	639	840	311	0.65
I65F1	406	-	72	639	898	311	0.65
I65F2	359	-	119	639	881	311	0.65
I65F3	311	-	167	639	864	311	0.65
I65F5	239	-	239	639	840	311	0.65

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 CHLORIDE PENETRATION PROFILE

Figures 1 to 3 show chloride penetration profiles for concrete mixtures. The chloride contents were reported in the percentage of binder (by weight). In Figure 1, for control concretes I and V at W/B ratios of 0.45, 0.55, and 0.65, the results indicated that there was a substantial variation in chloride content at a depth less than 15 mm from the surface. However, beyond 15 mm depth, concretes I and V with lower W/B ratio tended to have lower chloride content (chloride penetration profile) than that with higher W/B ratio. These results clearly supported the general knowledge that concrete with lower W/B ratio gave higher strength and lower water permeability, resulted in lower chloride ingress. Owing to these results, concrete with high compressive strength could produce a good result on durability of concrete in marine environment. In addition, at the same W/B ratio, concrete from Portland cement type I gave a better chloride resistance than concrete from Portland cement type V, since it was distinctly presented at more depth of chloride content in concrete cores. It could also be explained that chloride was more bound when C₃A content of the cement was higher. Since Portland cement type I used in this study had higher C₃A content than type V for 5 times, approximately, and consequently had less chloride content than of concrete type V. This result was also confirmed by other research [9]. Figure 2 shows chloride penetration profiles of control concretes using Portland cement type I comparing to original and classified fly ash concretes. The result showed that the original and classified fly ash concretes provided the lower chloride content than concretes without fly ash at the same W/B ratio. This result is confirmed by several researches [10-11] that the pozzolanic reaction of fly ash in concrete performs lower permeability, thus leads to lower chloride ingress than normal concrete. It can also be seen that fly ash concrete with W/B ratio of 0.65 provides a better resistance of chloride ingress than the normal concrete with W/B ratio of 0.45. Evidence is clearly shown in Figure. 2. Focusing on 1% chloride content which was detected at 35, 45, and 50-mm covering depths of control concrete I with W/B ratios of 0.45, 0.55, and 0.65 respectively, while the same amount of chloride content was found at 22, 25, 32, and 33-mm depths of original fly ash concretes containing 50, 35, 25, and 15% (by weight) of fly ash, respectively. This implies that, if concrete I with W/B ratio of 0.45 is used in marine environment and is destroyed by 1% of chloride content, it will need 35-mm covering depth to prevent the destruction. However, only 22-mm covering depth of the 50% original fly ash concrete with W/B ratio 0.65 is sufficient to protect this damage. Figure 3 shows the effect of addition of original and classified fly ashes on chloride content of fly ash concretes with W/B ratio 0.65 at 4-year exposure. The results showed the similar trend of chloride

content at any covering depth, and the increase of fly ash replacement reduced the chloride penetration profile. The concrete with classified fly ash gave a good result in lower chloride penetration profile comparing to concrete with original fly ash. In addition, concrete with original or classified fly ashes up to 35% by weight of binder did not show any chloride content at 50-mm covering depth, while 1.2% of chloride content was found in concrete without fly ash.

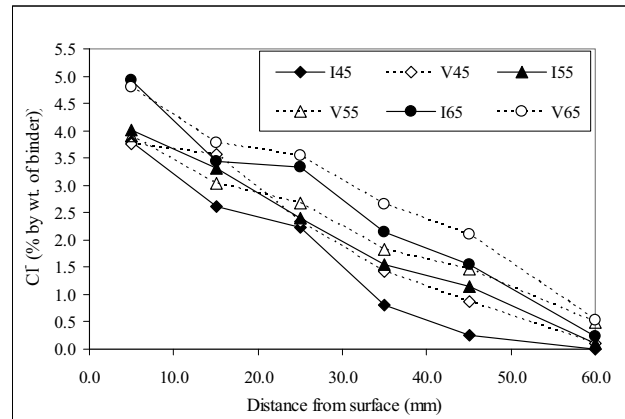


Figure 1. Effect of W/B ratio on chloride penetration profile of Portland cement type I and V concretes at 4-year exposure.

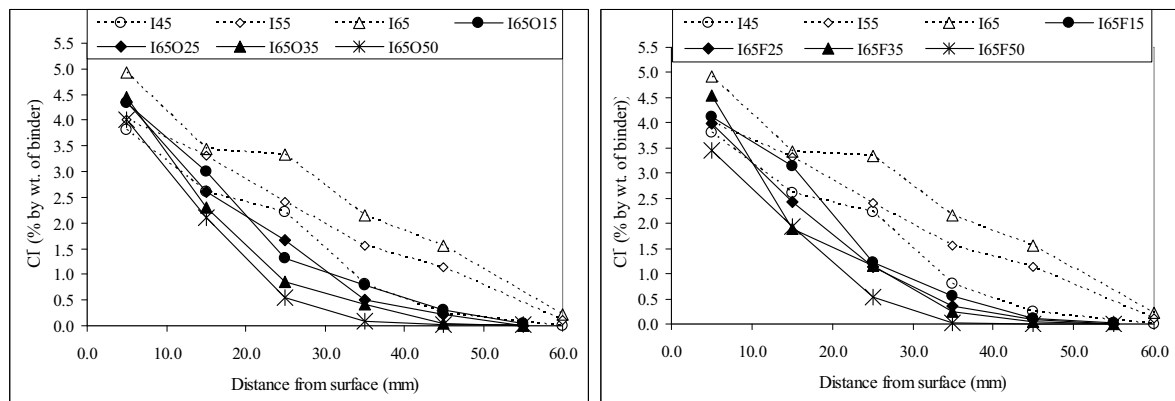


Figure 2. Chloride penetration profile of original and classified fly ash concretes compare to Portland cement type I concrete at 4-year exposure.

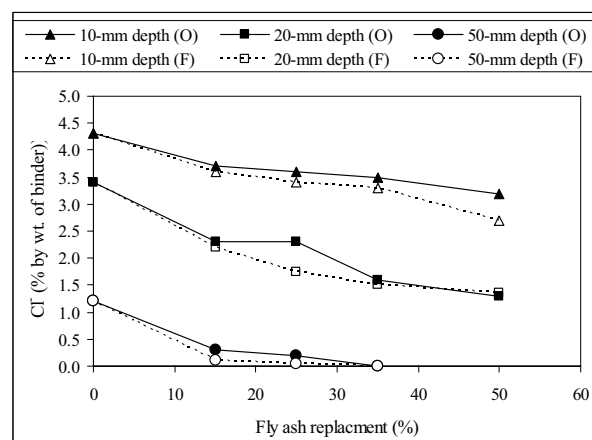
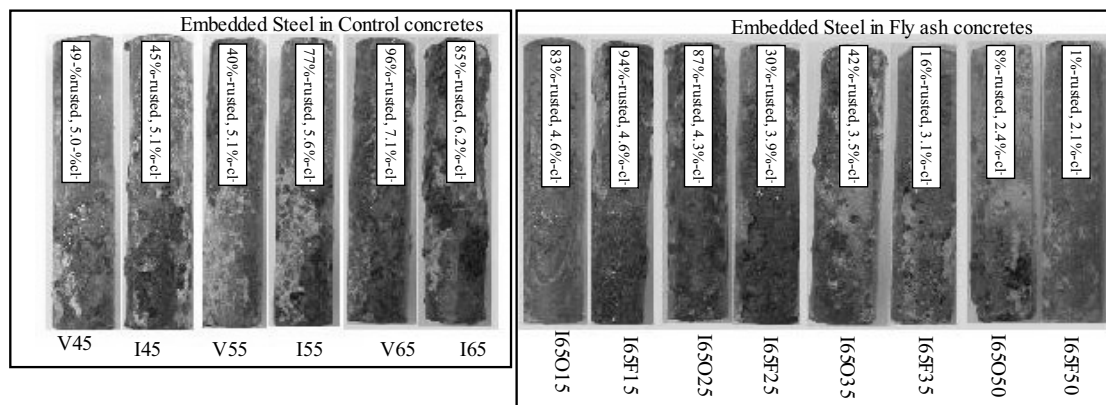


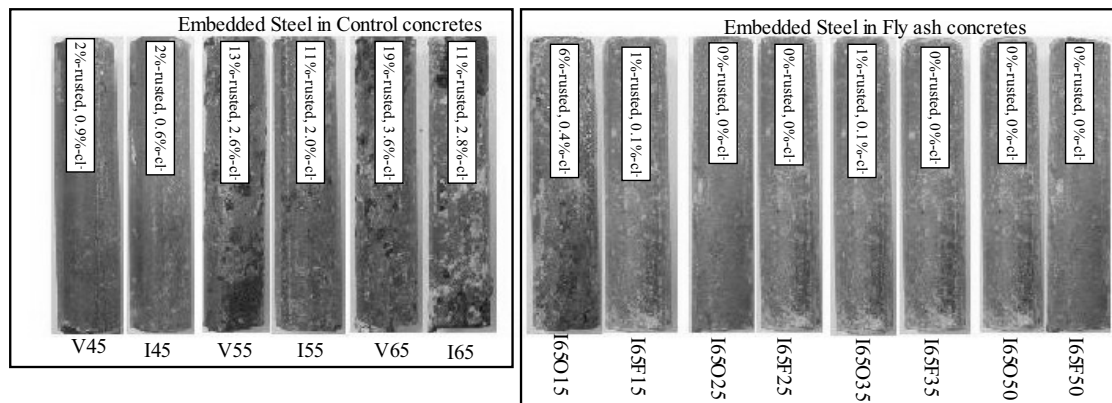
Figure 3. Effect of original and classified fly ashes on chloride content at concrete covering depth of 10, 20, and 50 mm for 4-year exposure.

3.2 CORROSION OF THE EMBEDDED STEEL

Figure 4 shows the percentages of rusted area relating to chloride content at the position of the embedded steel in concrete at 4-year exposure. The results indicated that the higher is the chloride content in concrete, the higher is the corroded steel. The corrosion of embedded steel with 10-mm covering depth was extremely rusted in all specimens and could not recognize what concrete mixture provided the best result. Figure 4(a) shows the embedded steel with 20-mm covering depth of all concretes. It was found that W/B ratio had affected on the corrosion of embedded steel of the control concretes. The corrosion was reduced with the decrease in W/B ratio. For example, concretes I45, I55, and I65 had percentages of rusted area at 20-mm depth of 45, 77, and 85%, respectively. Comparison of corroded embedded steel between concrete I and V, it was found that embedded steel in concrete V had more corrosion than that of concrete I. The use of fly ash affected on the reducing of corrosion of embedded steel. The embedded steel with 50-mm covering depth was rustless in all fly ash concretes, however, slightly rusty steel could be seen in concrete I and V with W/B ratios of 0.55 and 0.65 as shown in Figure 4(b). Interestingly, concretes with the replacement of both original and classified fly ashes at the percentage between 15 and 50 did not have or have little corrosion of steel at 50-mm covering depth of 4-year exposure in marine environment.



(a) Embedded steels extracted from 20-mm covering depth of control concretes and fly ash concretes.



(b) Embedded steels extracted from 50-mm covering depth of control concretes and fly ash concretes.

Figure 4. Chloride content at the position of the embedded steel related to the percentages rusted area of embedded steel which was removed from concretes at 4-year exposure.

4. CONCLUSION

Based on the experimental investigation reported in this paper, the following conclusions are drawn:

1. Concretes from Portland cement type I gave chloride penetration profile lower than that of concretes from Portland cement type V.
2. Fly ash concretes had chloride penetration profile lower than that of concretes without fly ash. The increase of fly ash replacement in concrete could reduce the ingress of chloride in concrete.
3. The 50% replacement of classified fly ash in concrete produced the lowest chloride penetration profile.
4. Fly ash concretes at 4-year exposure in marine environment had a little or no corrosion of steel when 50- mm covering depth of concrete was used.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the financial supports from the Thailand Research Fund (TRF) who sponsored the research under the Royal Golden Jubilee Ph.D. program, the Commission on Higher Education of Thailand under the Staff Development Project, the Electricity Generating Authority of Thailand for the first two-year research, and the Siam City Cement Plc., in cooperation with Thailand Research Fund. Thanks are also to the departments of civil engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok and Burapha University, Thailand for providing their facilities and equipments.

6. REFERENCES

1. Castro, P., De Rincon, OT. and Pazini, EJ., "Interpretation of chloride penetration profiles from concrete exposed to tropical marine environments". *Cement and Concrete Research*; Vol. 31, 2001, pp. 529-537.
2. Lee, CY., Lee, HK. and Lee, KM., "Strength and micro structural characteristics of chemically activated fly ash-cement systems". *Cement and Concrete Research*; Vol. 33, 2003, pp. 425-431.
3. Wang, A., Zhang, C. and Sun, W., "Fly ash effects III the micro aggregate effect of fly ash". *Cement and Concrete Research*; Vol. 34, 2004, pp. 2061-2066.
4. Gengying, Li., "Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂". *Cement and Concrete Research*; Vol. 33, 2004, pp. 425-431.
5. Troconis de Rincon, O., Castro, P., Moreno, EI., Torres-Acosta, AA., Moron de Bravo, O., Arrieta, I., Garcia, C., Garcia, D. and Martinez-Madrid, M., "Chloride penetration profile in two marine structures-meaning and some predictions". *Building and Environment*; Vol. 39, 2004, pp. 1065-1070.
6. Morris, W., Vico, A., Vazquez, M. and Sanchez, SR., "Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements". *Corrosion Science*; Vol. 44, 2002, pp. 81-99.
7. Dehwah, HAF., Maslehuddin, M. and Austin, SA., "Long-term effect of sulfate ions and associated cat ion type on chloride-induced reinforcement corrosion in Portland cement concretes". *Cement and Concrete Composites*; Vol. 24, 2002, pp. 17-25.
8. American Society for Testing and Materials, 1997, "ASTM C1152 : Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete". In *Annual Books of ASTM Standards*; Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, 1997, pp. 627-629.
9. Sakr, K., "Effect of cement type on the corrosion of reinforcing steel bars exposed to acidic media using electrochemical techniques". *Cement and Concrete Research*; Vol. 35, 2005, pp. 1820-1826.
10. Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T., "Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste". *Cement and Concrete Composite*; Vol. 27, 2005, pp. 425-28.
11. Arya, C. and Xu, Y., "Effect of cement type on chloride binding and corrosion of steel in concrete". *Cement and Concrete Research*; Vol. 25, 1995, pp. 893-902.

บทคัดย่อของบทความที่อยู่ระหว่างการพิจารณา

ผลกระทบของน้ำทะเลต่อนกริตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินจากระบบฟลูอิดไดซ์เบด

ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ¹ ธวัชชัย สาสกุล¹ วิเชียร ชาลี² และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล¹

¹มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด กรุงเทพฯ 10140

²มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษาความแตกต่างของการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินจากระบบฟลูอิดไดซ์เบด เพื่อดำเนินการกักกรองเนื่องจากน้ำทะเล โดยศึกษากำลังอัด การซึมผ่านของคลอไรด์ และการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต การศึกษาทำการหล่อคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 จากนั้นแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าถ่านหินที่บดละเอียดจนมีอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 2 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ในคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200 มม. ให้มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 20 และ 50 มม. บ่มคอนกรีตในน้ำประปา 28 วัน จากนั้นนำคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลบแห้ง และเก็บตัวอย่างทดสอบกำลังอัด การซึมผ่านของคลอไรด์ และวัดพื้นที่การเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ที่อายุ 1 ปี

หลังจากคอนกรีตแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 1 ปี กำลังอัดมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาเล็กน้อย คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสมมากขึ้น ช่วยให้การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ดีขึ้น นอกจากนั้น การใช้เถ้าถ่านหินในส่วนผสมช่วยลดการกัดกร่อนของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต เมื่อพิจารณาความแตกต่างของการใช้ปูนซีเมนต์ทั้งสองประเภท พบว่า คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าถ่านหินมากกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินเล็กน้อย ส่วนการเกิดสนิมของแท่งเหล็กยังไม่เห็นความแตกต่างของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น