ผลกระทบของน้ำทะเลต่อกำลังอัด การซึมผ่านของคลอไรด์ และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี

วิเชียร ชาลี [1] มณเฑียร ฑีฆวาณิช [2] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล [3]
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
และ ประสิทธิ์ อุตส่าห์พานิช [4]
บริษัท โตโยไทย จำกัด ดินแดง กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของน้ำทะเลต่อกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โดยใช้คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V สำหรับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินไม่แยกขนาดและเถ้าถ่านหินแยกขนาดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำหนดให้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ในทุกส่วนผสมทำการหล่อคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม.^{3} และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. โดยมีคอนกรีตหุ้มเหล็กหนา 10, 20, 50 และ 75 มม. ภายหลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำประปาจนมีอายุครบ 28 วัน ได้นำตัวอย่างไปแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้ง หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างมาเจาะทดสอบกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ระดับความลึกต่างๆ หลังจากที่แช่คอนกรีตในน้ำทะเลเป็นเวลา 4 ปี

ผลการวิจัยพบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I มีการแทรกซึมของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V เล็กน้อย และการใช้เถ้าถ่านหินในการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต และลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ดี โดยไม่พบการเกิดสนิมเหล็กเมื่อใช้ระยะหุ้มหนา 50 มม. ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V พบการเกิดสนิมเหล็ก คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แยกขนาดละเอียดมีการแทรกซึมของคลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินที่ไม่แยกขนาด นอกจากนี้กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 4 ปี ขณะที่กำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการกัดกร่อนของน้ำทะเล

คำสำคัญ : เถ้าถ่านหิน / สภาพแวดล้อมทะเล / การแทรกซึมของคลอไรด์ / การเกิดสนิม / กำลังอัด / ระยะหุ้มเหล็กเสริม

---

[1] นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
[2] นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
[3] รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
[4] วิศวกรโยธา

Effect of Seawater on Compressive Strength, Chloride Penetration and Corrosion of Steel in Fly Ash Concrete for 4-Year Exposure in Marine Environment

Wichian Chalee [1] Monthien Teekavanit [2] Chai Jaturapitakkul [3]
King Monkut's University of Technology Thonburi, Bangmood, Toongkru, Bangkok 10140
and Prasit Ausapanit [4]
Toyo-Thai Co., Ltd. Asok, Dindang, Bangkok

Abstract

In this study, effects of seawater on compressive strength, chloride penetration and corrosion of steel in Mae-Moh fly ash concrete are investigated. 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 the rate of 15, 25, 35, and 50 percent by weight of binder. Water to cementitious material ratio was kept constant at 0.65. Concrete cubes of 200x200x200 mm^3 were cast and steel bars of 12-mm diameter and 50-mm length were embedded at covering depth of 10, 20, 50, and 75 mm. The concrete cubes were cured in fresh water for 28 days, then they were placed on the seashore under wet-dry condition. The specimens were tested for the compressive strength, chloride content and corrosion of embedded steel after being exposed to marine environment for 4 years.

The results showed that concretes mixed with Portland cement type I tend to have less of chloride penetration than those of concretes mixed with Portland cement type V. The increase of fly ash replacement resulted in the reducing of chloride concentration as well as reducing the corrosion of steel bars. It was found that no rusty of steel bars with fly ash concrete when the covering depth of 50 mm was used. However, the corrosion of steel bar in Portland cement concretes type I and V were found. Concretes mixed with classified fly ash had less chloride penetration as compared to the concretes mixed with original fly ash. In addition, the compressive strength of fly ash concrete increased after 4-year exposure while those of concretes without fly ash tended to have lower compressive strength.

Keywords : Fly Ash / Marine Environment / Chloride Penetration / Corrosion / Compressive Strength / Covering Depth

---

[1] *Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering.*
[2] *Graduate Student, Department of Civil Engineering.*
[3] *Associate Professor, Department of Civil Engineering.*
[4] *Civil Engineer.*

1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สภาพแวดล้อมบริเวณชายฝั่งทะเลมักพบปัญหาเหล็กเสริมเป็นสนิม เนื่องจากการกัดกร่อนของน้ำทะเลซึ่งมีเกลือต่างๆ ละลายอยู่ เกลือส่วนใหญ่ได้แก่คลอไรด์และซัลเฟต คลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม วิธีการลดปัญหาเหล็กเสริมเป็นสนิมมีด้วยกันหลายวิธี การปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตโดยใช้เถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมในคอนกรีตเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ลดปัญหานี้ เนื่องจากเถ้าถ่านหินมีคุณสมบัติทำให้คอนกรีตมีค่าการซึมผ่านของน้ำต่ำลง [1] ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาถึงพฤติกรรมการกัดกร่อนของน้ำทะเลต่อคอนกรีต และการใช้เถ้าถ่านหินเพื่อป้องกันเหล็กเสริมเป็นสนิม เช่น งานวิจัยของ Saadoun และคณะ [2] ได้ทำการวิจัยโดยฝังเหล็กในแท่งคอนกรีตแล้วแช่แท่งคอนกรีตในโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1,000 วัน ผลที่ได้ปรากฏว่าคอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 30 สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าคอนกรีตประเภทที่ I และ V ถึง 2 และ 3 เท่า ตามลำดับ ระยะเวลาการกัดกร่อนเริ่มต้นของคอนกรีตที่มีปริมาณ C_3A ร้อยละ 9, 11 และ 14 มีค่ามากกว่าคอนกรีตที่มี C_3A ร้อยละ 2 เท่ากับ 1.75, 1.93 และ 2.45 เท่า ตามลำดับ Thomas และคณะ [3] ได้ทำการทดสอบโดยหล่อคอนกรีตซึ่งฝังแท่งเหล็กไว้ภายใน โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 0 ถึง 50 จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่น้ำทะเล ผลปรากฏว่าอัตราการแพร่กระจายและการกัดกร่อนเหล็กเสริมมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มเริ่มต้น แต่เมื่อแช่น้ำทะเลนานๆ จะมีผลไม่แตกต่างกัน อัตราการแพร่กระจายของคลอไรด์และการสูญเสียน้ำหนักเหล็กเสริมเนื่องจากการกัดกร่อนในคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดาและยิ่งลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหิน นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวกับการเก็บข้อมูลการกัดกร่อนของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเล [4-6] แต่งานวิจัยที่ผ่านมายังขาดการศึกษาถึงผลทางด้านความละเอียดของเถ้าถ่านหินต่อความคงทนของคอนกรีตในน้ำทะเล รวมทั้งงานวิจัยที่มีการเก็บข้อมูลด้านกำลังอัด การซึมผ่านของคลอไรด์ การเกิดสนิมในเหล็กเสริมที่มีระยะหุ้มของคอนกรีตต่างๆ ควบคู่กันไปมีไม่มากนักโดยเฉพาะข้อมูลที่มีการศึกษาในสภาพแวดล้อมจริงในประเทศไทยซึ่งเป็นเขตร้อนชื้นที่แตกต่างจากงานวิจัยของต่างประเทศที่มักเป็นเขตอบอุ่น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I, ความละเอียดของเถ้าถ่านหิน และความหนาของคอนกรีตที่ใช้หุ้มเหล็ก

2. วิธีการทดสอบ

การศึกษานี้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ใช้เถ้าถ่านหินที่ได้จากโรงงานโดยตรงและเถ้าถ่านหินที่แยกขนาดจนมีความละเอียดสูงขึ้นแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่วนคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V ไม่มีการผสมเถ้าถ่านหิน ดังนั้นมีคอนกรีตในงานวิจัยนี้ 10 ส่วนผสม โดยให้คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I เป็นส่วนผสมควบคุม จากนั้นแทนที่เถ้าถ่านหินในอัตราส่วนต่างๆ ที่กำหนด ซึ่งส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 1 หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม^3. และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. โดยมีความหนาของคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. นอกจากนี้ยังหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อใช้ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเลของโรงพยาบาลสมเด็จพระบรม ราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งดังแสดงในรูปที่ 1 หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตครบ 4 ปี ได้นำคอนกรีตมาทุบดูการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตโดยการวัดพื้นที่ของการเกิดสนิมเหล็ก และเจาะตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. โดยวิธีการเจาะแห้ง เพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่ระยะความลึกต่างๆ ด้วยวิธีการหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride) ที่ละลายในกรดได้ (Acid-Soluble Chloride) ตาม ASTM C1152 [7] ตลอดจนทำการเจาะตัวอย่างคอนกรีตแบบเปียกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. สูง 100 มม. เพื่อทดสอบ

กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 3 และ 4 ปีด้วย

ความหมายของสัญลักษณ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีดังนี้

" I, V " หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ตามลำดับ

" O, F " หมายถึง เถ้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการคัดแยกขนาด (ได้จากโรงงานโดยตรง, Original Fly Ash) และเถ้าถ่านหินที่ผ่านการคัดแยกขนาดละเอียด (Fine Classified Fly Ash) ตามลำดับ

"15, 25, 35, 50" หมายถึง คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ I ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

" IO15 " หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินไม่แยกขนาด (O) ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

รูปที่ 1 ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

Mix No.	อัตราส่วนผสมของคอนกรีต (กก./ม.^{3})					
	ปูนซีเมนต์	เถ้าถ่านหินไม่ผ่านการคัดแยก (O)	เถ้าถ่านหินผ่านการคัดแยก (F)	ทราย	Coarse-Agg	น้ำ
I	478	-	-	639	922	311
V	478	-	-	639	922	311
IO15	406	72	-	639	898	311
IO25	359	119	-	639	881	311
IO35	311	167	-	639	864	311
IO50	239	239	-	639	840	311
IF15	406	-	72	639	898	311
IF25	359	-	119	639	881	311
IF35	311	-	167	639	864	311
IF50	239	-	239	639	840	311

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และ 3.11 ตามลำดับ ส่วนเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่ไม่ได้แยกขนาด (O) มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.22 และเมื่อนำเถ้าถ่านหินมาแยกขนาด พบว่าความถ่วงจำเพาะมีค่ามากขึ้นเป็น 2.38 เหตุที่เถ้าถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะเพิ่มมากขึ้นเพราะว่าเถ้าถ่านหินแยกขนาดมีขนาดอนุภาคเล็กและช่องว่างหรือรูพรุนของอนุภาคลดน้อยลง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I มีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 20 พื้นที่ผิวจำเพาะวิธีของเบลนเท่ากับ 3,250 ซม.^{2}/ก. และค่ากลางอนุภาค (d50) เท่ากับ 25 ไมโครเมตร มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V ที่มีค่าน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 9 พื้นที่ผิวจำเพาะ 4,495 ซม.^{2}/ก. และค่ากลางอนุภาค 19.2 ไมโครเมตร ส่วนเถ้าถ่านหินไม่ได้แยกขนาดและแยกขนาดมีพื้นที่ผิวจำเพาะวิธีของเบลนเท่ากับ 2,830 และ 5,780 ซม^2/ก. ตามลำดับ และมีค่ากลางอนุภาคเท่ากับ 30.6 และ 9.7 ไมโครเมตร ตามลำดับ

3.2 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน

ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และประเภทที่ V มี MgO, SO_3, LOI, C_3A และ C_4AF อยู่ในค่ามาตรฐานที่กำหนดของ ASTM C 150 [8] และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V มี C_3A น้อยกว่าร้อยละ 5 เมื่อพิจารณาผลรวมออกไซด์ของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ของเถ้าถ่านหินที่ไม่ผ่านการคัดแยกขนาดและเถ้าถ่านหินที่ผ่านการคัดแยกขนาดมีค่ารวมเท่ากับร้อยละ 79.45 และ 78.47 ตามลำดับ ทำให้จัดได้ว่าเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ไม่ผ่านการคัดแยกขนาด (O) และผ่านการคัดแยกขนาด (F) เป็นเถ้าถ่านหิน Class F หรือชั้นคุณภาพ 2ก

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมีโดยน้ำหนัก (%)	ตัวอย่างคอนกรีต			
	Cement I	Cement V	O	F
Silicon Dioxide, SiO_2	20.80	21.52	44.95	44.57
Aluminum Oxide, Al_2O_3	5.50	3.56	23.70	23.50
Iron Oxide, Fe_2O_3	3.16	4.51	10.80	10.40
Calcium Oxide, CaO	64.97	66.70	13.80	13.84
Magnesium Oxide, MgO	1.06	1.20	3.47	3.29
Sodium Oxide, Na_2O	0.08	0.10	0.07	0.08
Potassium Oxide, K_2O	0.55	0.24	2.38	2.59
Sulfur Trioxide, SO_3	2.96	2.11	1.31	1.24
Loss On Ignition, LOI	2.89	1.74	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	-	-

3.3 คุณสมบัติของน้ำทะเล

ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณที่นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ ซึ่งอยู่ที่โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา พบว่าน้ำทะเลมีสีใส แต่มีสีขุ่นในช่วงเดือนสิงหาคม โดยปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,200-18,800 มก./ล. และซัลเฟตระหว่าง 2,200-2,700 มก./ล. และมีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9-8.2 ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของสถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล [9] ที่พบว่าบริเวณชายฝั่งทะเลศรีราชามีค่าความเป็นกรดด่างระหว่าง 7.86-8.63

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์น้ำทะเล

เวลา / พารามิเตอร์	มกราคม 2545	พฤษภาคม 2545	สิงหาคม 2546	ธันวาคม 2546
pH	8.2	8.2	7.9	8.2
คลอไรด์ (มก./ล.)	18,035	16,210	17,125	18,820
ซัลเฟต (มก./ล)	2,240	2,500	2,230	2,680

3.4 ผลทดสอบกำลังของคอนกรีต

ตารางที่ 4 พบว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีแนวโน้มของกำลังอัดที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล 4 ปี ลดลงจากที่อายุ 28 วัน โดยคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีกำลังอัดที่แช่น้ำทะเล 4 ปี เท่ากับ 244 และ 241 กก./ซม.^{2} หรือมีร้อยละของกำลังอัดเท่ากับ 84.3 และ 85.0 ของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งการลดลงของกำลังอัดอาจมีผลเนื่องจากการกัดกร่อนของสารประกอบซัลเฟตและคลอไรด์ที่อยู่ในน้ำทะเล แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางกายภาพของสภาพแวดล้อมทะเล เช่น อุณหภูมิ แรงกระแทก ความชื้น และอื่นๆ ล้วนมีส่วนเกื้อหนุนต่อการส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง

ตารางที่ 4 กำลังอัดคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี

Mix No.	กำลังอัด (กก./ซม.^{2})			อัตราส่วนกำลังอัดที่อายุ 4 ปี / 28 วัน (%)
	28 วัน	3 ปี	4 ปี	
I	290	240	244	84.3
V	283	248	241	85.0
IO15	199	278	287	144.2
IO25	210	271	278	132.6
IO35	229	283	310	135.3
IO50	166	238	242	146.4
IF15	242	299	306	126.4
IF25	265	345	356	134.7
IF35	287	293	349	121.6
IF50	197	280	278	141.1

ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินทั้งที่แยกและไม่แยกขนาดมีการพัฒนากำลังอัดจากอายุ 28 วัน ถึงอายุที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 4 ปี ต่างจากคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินกล่าวคือ มีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยอัตราการเพิ่มของกำลังอัดในคอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 50 มีค่าสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [10] แม้ว่าคอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 50 มีการพัฒนากำลังอัดที่ดี แต่พบว่ากำลังอัดที่แช่น้ำทะเล 4 ปี มีค่าต่ำที่สุดเนื่องจากกำลังอัดเริ่มต้นมีค่าต่ำ โดยคอนกรีต IO15, IO25, IO35 และ IO50 มีกำลังอัดเมื่อแช่น้ำทะเล 4 ปี เท่ากับ 287, 278, 310 และ 242 กก./ซม.^{2} หรือคิดเป็นร้อยละ 144.2, 132.6, 135.3 และ 146.4 ของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ จะเห็นว่าการแทนที่เถ้าถ่านหินที่ไม่ผ่านการแยกขนาดถึงร้อยละ 50 แม้ว่าจะมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I มากที่อายุ 28 วัน แต่กำลังอัดระยะยาวที่อายุ 4 ปี ได้พัฒนาจนมีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V

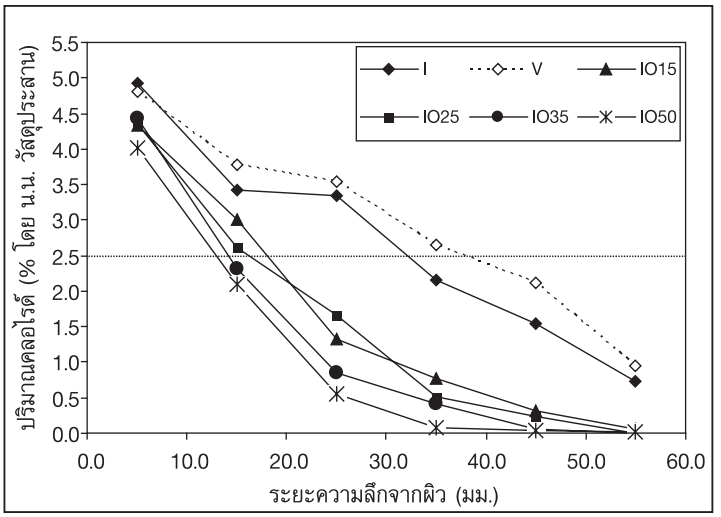
เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาดและแยกขนาด พบว่าการแทนที่เถ้าถ่านหินที่ผ่านการคัดแยกขนาด (F) ให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 4 ปี สูงกว่าคอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด (O) ทุกอัตราส่วนการแทนที่ แต่การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดจากอายุ 28 วัน ระหว่างคอนกรีตทั้ง 2 กลุ่ม ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่แยกขนาดและแยกขนาดมีร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 4 ปี ในช่วงร้อยละ 130 ถึง 145 และ 125 ถึง 140 ของกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ และเมื่อพิจารณากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นจาก 28 วัน ถึงอายุ 4 ปี พบว่าคอนกรีต IO15, IO25, IO35 และ IO50 มีกำลังอัดเพิ่มขึ้น 88, 68, 81 และ 76 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีต IF15, IF25, IF35 และ IF50 มีกำลังอัดเพิ่มขึ้น 64, 91, 62 และ 81 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ โดยทั้ง 2 กลุ่ม มีกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นจาก 28 วัน ไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแยกขนาดละเอียดสูงกว่าคอนกรีต ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาดในระยะยาวเป็นผลมาจากกำลังอัดเริ่มต้นที่สูงกว่า แต่การพัฒนากำลังในระยะยาวในสภาพแวดล้อมทะเลแทบไม่แตกต่างกัน

3.5 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล

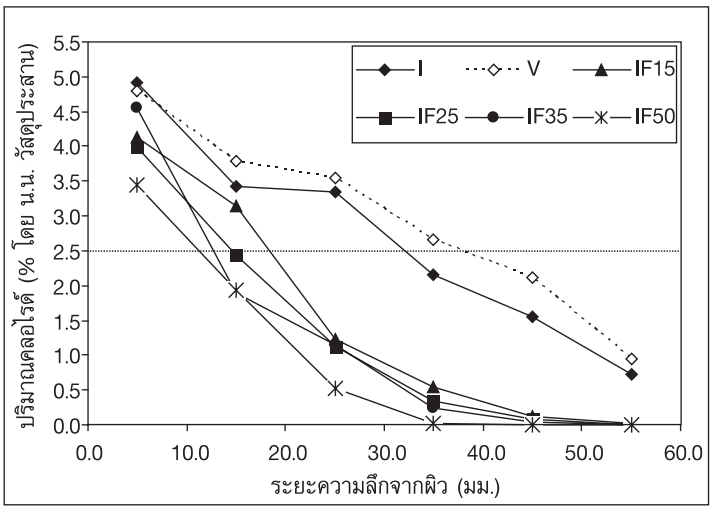
เมื่อพิจารณาปริมาณของสารประกอบคลอไรด์ที่ซึมเข้าในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I และ V ที่ระยะความลึกต่างๆ จากผิวหน้าคอนกรีต พบว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I มีปริมาณการซึมเข้าของคลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V ตลอดอายุการแช่คอนกรีต 4 ปี ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงลักษณะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่ามีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และน่าที่จะทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากกว่า ตลอดจนมีการซึมผ่านของคลอไรด์น้อยกว่า แต่ทั้งนี้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I มีปริมาณของ C_3A ที่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V ประมาณ 5 เท่า โดย C_3A สามารถทำการยึดจับคลอไรด์อิสระได้ดีซึ่งส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ต่ำกว่าประเภท V [1] อย่างไรก็ตาม การทดลองในสภาพแวดล้อมจริง มีองค์ประกอบอื่นๆ ที่จะส่งผลต่อผลการทดลองรวมทั้งลักษณะทางกายภาพด้วย เช่น อุณหภูมิ กระแสน้ำ การกระแทกของคลื่น เป็นต้น

ปริมาณของสารประกอบคลอไรด์ที่ซึมเข้าในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I ที่ผสมเถ้าถ่านหินทั้งที่ไม่แยกและแยกขนาดแสดงในรูปที่ 2 และ 3 พบว่าทุกอัตราส่วนการแทนที่เถ้าถ่านหินในคอนกรีตที่ระยะความลึกจากผิวน้อยกว่า 10 มม. มีปริมาณคลอไรด์ค่อนข้างสูงและมีค่าแปรปรวนสูงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ถึงแนวโน้มของสารประกอบคลอไรด์ที่ระยะความลึกดังกล่าวได้ แต่ที่ระยะความลึกที่มากขึ้นพบว่าปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทั้งที่แยกและไม่แยกขนาดมีปริมาณน้อยกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V อย่างชัดเจน โดยเฉพาะที่ระดับความลึกจากผิวที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าถ่านหินมีอนุภาคละเอียดเข้าไปอุดช่องว่างของเนื้อคอนกรีต ตลอดจนปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ลดจำนวนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายน้ำได้ เป็นผลให้คอนกรีตมีการซึมผ่านน้ำต่ำจึงสามารถลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ นอกจากนี้ ตามรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่า คอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินทั้งที่แยกและไม่ได้แยกขนาดมีแนวโน้มของการซึมผ่านของคลอไรด์เหมือนกัน กล่าวคือ เมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่ระยะความลึกต่างๆ มีปริมาณน้อยลงและมีแนวโน้มที่ชัดเจน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่แยกขนาดและเถ้าถ่านหินที่แยกขนาดละเอียด พบว่าทุกระยะความลึกของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินที่แยกขนาดละเอียด ให้ผลในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในสภาวะแวดล้อมทะเลที่อายุ 4 ปี ดีกว่าเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าถ่านหินที่มีขนาดละเอียดกว่าจะเข้าไปอุดช่องว่างในเนื้อคอนกรีตได้ดีกว่า ทำให้คอนกรีตทึบน้ำและมีการซึมผ่านน้ำหรือสารเคมีน้อยกว่า [11]

ข้อมูลการซึมผ่านของสารประกอบคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 4 ปี มีแนวโน้มที่ชัดเจนว่าการใช้คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะให้ผลในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นจะลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีขึ้น โดยถ้าพิจารณาปริมาณคลอไรด์ที่ร้อยละ 2.5 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่แยกขนาดร้อยละ 50 สามารถพบปริมาณคลอไรด์ดังกล่าวที่ระยะความลึก 12 มม. จากผิว ในขณะที่คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V พบที่ระดับความลึกจากผิว 33 และ 38 มม. ตามลำดับ ซึ่งปริมาณคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 ในคอนกรีตสามารถทำให้เหล็กเกิดสนิมได้ [12] การป้องกันการถูกทำลายดังกล่าวจะต้องการระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กสำหรับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V อย่างต่ำ 33 และ 38 มม. ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่แยกขนาดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ร้อยละ 50 ต้องการระยะหุ้มเหล็กเพียง 12 มม. และถ้าใช้เถ้าถ่านหินที่แยกขนาดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เท่ากันต้องการระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพียง 10 มม. เท่านั้น



รูปที่ 2 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I, V และคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่ผ่านการแยกขนาด (O) เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี

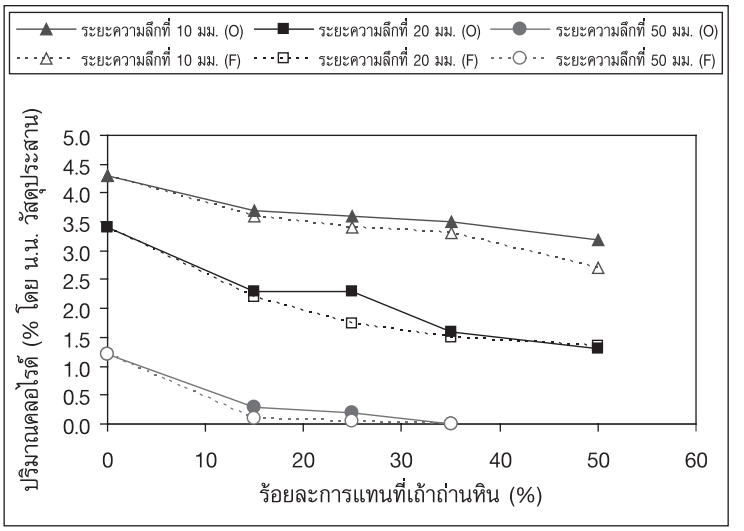


รูปที่ 3 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I, V และคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดละเอียด (F) เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี

3.6 การเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล

รูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลที่อายุ 4 ปี มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กหนา 10 มม. มีการเกิดสนิมเหล็กอย่างมากในคอนกรีตทุกส่วนผสม โดยคิดเป็นพื้นที่การเกิดสนิมร้อยละร้อย ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ถึงความแตกต่างระหว่างส่วนผสมต่างๆ ได้ และเมื่อพิจารณาที่ระดับความลึก 20 มม. พบว่า คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I เกิดสนิมน้อยกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V เล็กน้อย ซึ่งจากการพิจารณาปริมาณการซึมผ่านของสารประกอบคลอไรด์ดังที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นว่าปริมาณของคลอไรด์ซึมเข้าใน

คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V มีมากกว่า จึงส่งผลให้เกิดสนิมเหล็กมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I ที่ผสมเถ้าถ่านหินทั้งที่ไม่แยกและแยกขนาดละเอียด มีการเกิดสนิมเหล็กน้อยกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I และ V และเห็นผลชัดเจนที่ระยะความลึกจากผิวหน้าคอนกรีตมากขึ้น โดยการผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นการเกิดสนิมจะลดลง และเป็นที่น่าสังเกตว่าการผสมเถ้าถ่านหินในคอนกรีตถึงร้อยละ 50 มีการเกิดสนิมเหล็กน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ ซึ่งแนวโน้มการเกิดสนิมเหล็กที่ระยะความลึกอื่นๆ ก็เป็นไปในทิศทางเดียวกัน และสอดคล้องกับปริมาณของสารประกอบคลอไรด์ สำหรับที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กหนา 50 มม. พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทั้งที่แยกและไม่แยกขนาดไม่ปรากฏการเกิดสนิมเหล็ก แต่คอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I และ V มีสนิมเหล็กเกิดขึ้นเล็กน้อย โดยมีพื้นที่ที่เกิดสนิมและปริมาณคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 11, 19 และ 1.4, 1.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 10, 20 และ 50 มม. จากผิวหน้าคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี

จากข้อมูลการเกิดสนิมเหล็กดังที่กล่าวมาจะเห็นว่างานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมทะเลโดยทั่วไปที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I หรือ V ใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กหนา 50 มม. และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 หรือสูงกว่า พบว่าเมื่อก่อสร้างและใช้งานถึงระยะเวลา 4 ปี เหล็กเสริมในคอนกรีตมีโอกาสที่จะเกิดการกัดกร่อนเป็นสนิมได้ แต่คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินยังสามารถต้านทานการกัดกร่อนดังกล่าวได้ แต่ทั้งนี้ต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย เช่น การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตและสภาพทางกายภาพทั่วไป เช่น กระแสคลื่น การกัดเซาะของน้ำทะเล ก็ส่งผลในเชิงเกื้อหนุนต่อการกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมีในน้ำทะเล

3.7 การวิเคราะห์ภาพรวมการกัดกร่อนของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล

การศึกษาการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลต่อคอนกรีตจำเป็นต้องวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด การซึมผ่านของสารประกอบคลอไรด์ตลอดจนการเกิดสนิมในเหล็กเสริมควบคู่กันไป เพราะ

คุณสมบัติเหล่านี้ส่งผลต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จากข้อมูลด้านปริมาณคลอไรด์ และการเกิดสนิมในเหล็กเสริมที่ระยะความหนาคอนกรีตหุ้มต่างๆ สามารถสร้างเกณฑ์ที่บ่งบอกถึงระดับของการกัดกร่อนคอนกรีตที่ศึกษาในครั้งนี้ที่ระยะเวลาการแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 4 ปี ดังแสดงในตารางที่ 5 และสรุปสภาวะการกัดกร่อนของคอนกรีตที่ระยะความหนาคอนกรีตหุ้มต่างๆ ได้ดังตารางที่ 6 เห็นได้ว่าคอนกรีตทุกส่วนผสมมีสภาวะการกัดกร่อนรุนแรงที่ระดับความลึก 10 มม. ยกเว้นคอนกรีต IF50 ที่มีการกัดกร่อนในระดับต่ำ นอกจากนั้นพบว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I, V และคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินที่ไม่ผ่านการคัดแยกขนาดมีการกัดกร่อนในสภาวะรุนแรง ถึงระดับความลึก 20 มม. แต่การแทนที่เถ้าถ่านหินที่ไม่แยกขนาดร้อยละ 50 ไม่ปรากฏการกัดกร่อนที่ระยะความลึก 20 มม. ในขณะเดียวกันการแทนที่เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดเกือบทุกสัดส่วนผสมที่ระยะความลึกของคอนกรีตหนา 20 มม. มีการกัดกร่อนอยู่ในสภาวะต่ำถึงปานกลางและการแทนที่เถ้าถ่านหินถึงร้อยละ 50 ไม่ปรากฏการกัดกร่อน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม. สำหรับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 หรือสูงกว่าและอยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลไม่เพียงพอต่อการต้านทานการกัดกร่อน ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดการกัดกร่อน เหล็กเสริมเมื่ออายุการแช่ 4 ปี ยกเว้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 แต่อย่างไรก็ตาม การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนดังกล่าวก็มีผลเสียทางด้านกำลังอัดของคอนกรีตที่ต่ำในช่วงอายุต้น (ที่อายุ 28 วัน)

เมื่อพิจารณาที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กหนา 50 มม. ซึ่งเป็นระยะหุ้มที่มีการใช้งานจริงในงานก่อสร้าง พบว่ามีการกัดกร่อนเกิดขึ้นในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I และ V ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตดังกล่าวไม่เหมาะสมที่จะใช้ในโครงสร้างที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมทะเล เพราะระยะเวลาแค่ 4 ปี ก็มีการกัดกร่อนในเหล็กเสริมเกิดขึ้นแล้วและจะส่งผลให้กัดกร่อนมากขึ้นในระยะเวลาต่อมา แต่ทั้งนี้เมื่อพิจารณาส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานค่อนข้างสูงถึง 0.65 ซึ่งโดยปกติก็ไม่ควรนำมาใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลอยู่แล้ว ขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกสัดส่วนผสมไม่พบการกัดกร่อนที่อายุการแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 4 ปี

ตารางที่ 5 สภาวะการกัดกร่อนของคอนกรีตในน้ำทะเลภายใต้เงื่อนไขของปริมาณคลอไรด์และการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

สภาวะการกัดกร่อน	ร้อยละของพื้นที่สนิมเหล็ก (%)	ร้อยละปริมาณคลอไรด์ (%)
ไม่กัดกร่อน	0 - 10	0-0.5
กัดกร่อนน้อย	10 - 30	0.5-1.0
กัดกร่อนปานกลาง	30-50	1.0-1.5
กัดกร่อนสูง	50-80	1.5-2.0
กัดกร่อนรุนแรง	80-100	>2.0

ตารางที่ 6 สภาวะการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีระยะหุ้มต่างๆ

ส่วนผสม	ไม่กัดกร่อน				สภาวะกัดกร่อนน้อย				สภาวะกัดกร่อนปานกลาง				สภาวะกัดกร่อนสูง				สภาวะกัดกร่อนรุนแรง			
	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก (มม.)																			
	10	20	50	75	10	20	50	75	10	20	50	75	10	20	50	75	10	20	50	75
I				●			●										●	●		
V							●	●									●	●		
IO15			●	●													●	●		
IO25			●	●													●	●		
IO35			●	●						●							●			
IO50		●	●	●													●			
IF15			●	●													●	●		
IF25			●	●						●							●			
IF35			●	●		●											●			
IF50		●	●	●	●															

หมายเหตุ "●" แสดงว่ามีการกัดกร่อนที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก

4. สรุปผลการทดสอบ

1. คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกสัดส่วนผสมมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 28 วัน ถึง 4 ปี ที่แช่ในน้ำทะเล ในขณะที่คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีแนวโน้มของกำลังอัดลดลงเล็กน้อย

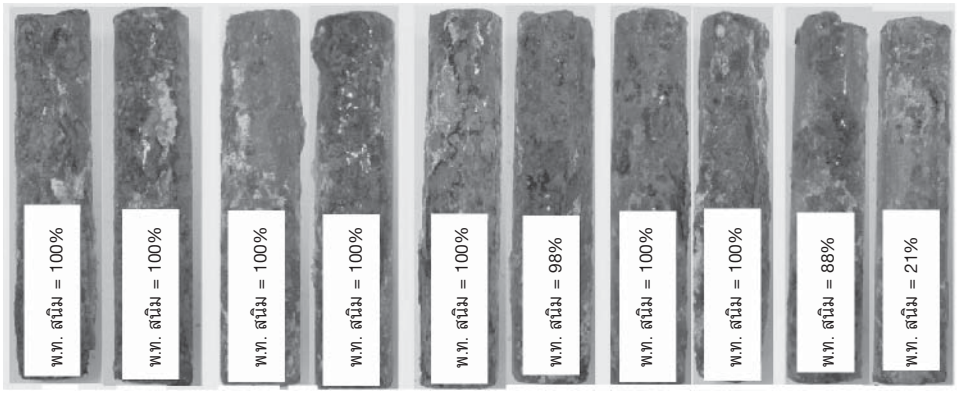
2. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I มีแนวโน้มต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในสภาพแวดล้อมทะเลได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V

3. คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ด้วยเถ้าถ่านหินทุกสัดส่วนผสม สามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V และการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้นพบว่าการซึมผ่านของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลจะลดลง

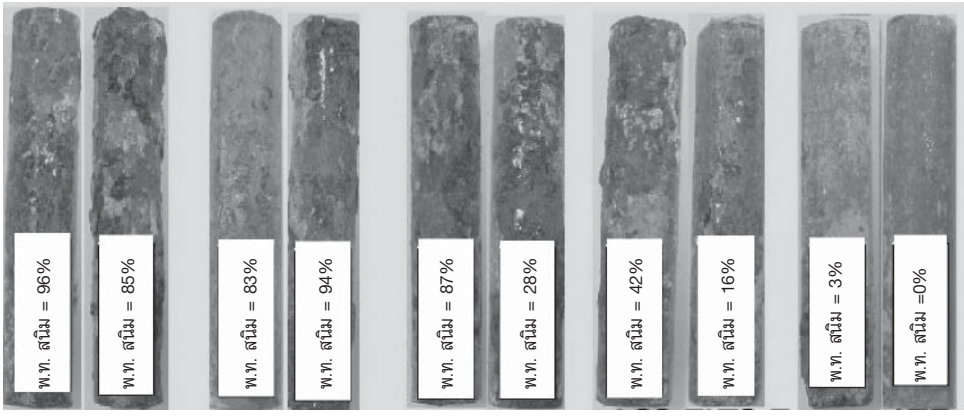
4. เมื่อแช่ในน้ำทะเล 4 ปี คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ด้วยเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมไม่ปรากฏการกัดกร่อนเหล็กเสริมคอนกรีตที่ระยะของคอนกรีตหุ้มเหล็กหนา 50 มม. ในขณะที่คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีการกัดกร่อนเกิดขึ้น

5. ที่อัตราส่วนการแทนที่เถ้าถ่านหินที่เท่ากัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดมากกว่าสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลได้ดีกว่า และมีการเกิดสนิมเหล็กน้อยกว่าคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดน้อยกว่า

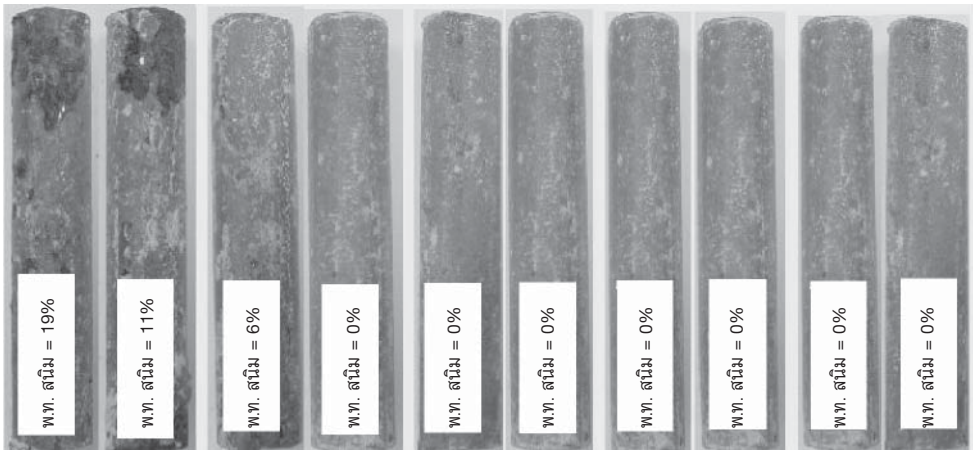
6. ส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมทะเลได้แก่ส่วนผสมที่แทนที่เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเนื่องจากมีกำลังอัดที่สูงและการซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำ



ก. สนิมเหล็กที่เกิดในเหล็กเสริมซึ่งมีระยะหุ้มคอนกรีตหนา 10 มม.



ข. สนิมเหล็กที่เกิดในเหล็กเสริมซึ่งมีระยะหุ้มคอนกรีตหนา 20 มม.



ค. สนิมเหล็กที่เกิดในเหล็กเสริมซึ่งมีระยะหุ้มคอนกรีตหนา 50 มม.

รูปที่ 5 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ระยะหุ้มคอนกรีตหนา 10, 20 และ 50 มม. เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็น เวลา 4 ปี

5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้หากไม่ได้รับทุนสนับสนุนจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในการเก็บข้อมูลในช่วง 2 ปีแรกของการวิจัย ขอขอบคุณคณะกรรมการอุดมศึกษาภายใต้โครงการพัฒนาอาจารย์ สาขาขาดแคลนเพื่อศึกษาต่อภายในประเทศตามความต้องการของมหาวิทยาลัยบูรพา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก นอกจากนี้ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีและมหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านอุปกรณ์เครื่องมือและห้องปฏิบัติการตลอดจนขอขอบคุณโรงพยาบาล สมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการแช่ตัวอย่างคอนกรีต

6. เอกสารอ้างอิง

1. Neville, A.M., 1996, *Properties of Concrete*, 4th ed., England, Addison Wesley, pp. 514-569.

2. Saadoun S.S, Rasheeduzzafar and Gahtani, A.S., 1993, "Corrosion of Reinforced Steel in Fly Ash Blended Cement Concrete," *Journal of Material in Civil Engineering*, Vol. 5, No. 3, August, pp. 356-371.

3. Thomas, M.D.A., Matthews, J.D. and Haynes, C.A., 1996, "Chloride Diffusion and Reinforcement Corrosion in Marine Exposed Concrete Containing Pulverized-Fuel Ash," *Corrosion of Reinforcement in Concrete*, SCI, pp. 198-212.

4. Morris, W., Vico, A., Vazquez, M., and Sanchez, S.R, 2002, "Corrosion of Reinforcing Steel Evaluated by Means of Concrete Resistivity Measurements," *Corrosion Science*, Vol. 44, pp. 81-99.

5. Dehwah, H.A.F., Maslehuddin, M., and Austin, S. A., 2002, "Long-term Effect of Sulfate Ions and Associated Cation Type on Chloride-induced Reinforcement Corrosion in Portland Cement Concretes," *Cement and Concrete Composites*, Vol 24, pp. 17-25.

6. Bai, J., Wild, S. and Sabir, B.B., 2001, "Chloride Ingress and Strength Loss in Concrete with Different PC-PFA-MK Binder Compositions Exposed to Synthetic Seawater," *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 353-362.

7. American Society for Testing and Materials, 1997, "ASTM C1152 : Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete," *1997 Annual Books of ASTM Standards*, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 627-629.

8. American Society for Testing and Materials, 1997, "ASTM C150 : Standard Specification for Portland Cement," *1997 Annual Books of ASTM Standards*, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 128-132.

9. สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา, 2537, "การศึกษาคุณภาพน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออก," มิถุนายน, หน้า 55

10. Thomas, M. D. A. and Matthews, J. D., 2004, "Performance of pfa Concrete in Marine Environment-10-year Results," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25.

11. ณรงค์ชัย วิวัฒนาช่าง, สมิตร ส่งพิริยะกิจ, ชัยจาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2542, "บทบาทของเถ้าถ่านหินที่แยกละเอียด 5 ชนิด ต่อกำลังอัดของคอนกรีต," *เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5*, 24-26 มีนาคม, จ.ชลบุรี, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า 208-214

12. 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, pp. 1001-1013.