
การปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลโดยใช้เถ้าถ่านหิน Improving Durability of Concrete under Marine Environment by Using Fly Ash

วิเชียร ชาลี^{1*} และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Wichian Chalee^{1*} and Chai Jaturapitakul²

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University.

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล ทำการหล่อคอนกรีตควบคุมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.65 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ด้วยเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ในคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200 มม. ให้มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. นำคอนกรีตไปแช่น้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง ที่ จ.ชลบุรี และเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ และวัดการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่อายุ 3 ปี ผลการวิจัยพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว คอนกรีตที่เพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสมมากขึ้น สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนในเหล็กเสริมได้ดีขึ้น นอกจากนั้นพบว่า คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินสามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าถ่านหิน

คำสำคัญ : ความคงทนของคอนกรีต การแทรกซึมของคลอไรด์ การกัดกร่อนเหล็กเสริม เถ้าถ่านหิน สภาวะแวดล้อมทะเล

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

In this study, chloride penetration profile, and corrosion of embedded steel bars in concrete containing fly ash in marine environment were investigated. Control concretes were designed using Portland cement type I and V with water to binder ratios (W/B) of 0.65. The Mae Moh fly ash was used to replace Portland cement type I and V at the percentages of 0, 15, 25, 35 and 50 by weight of binder at the same W/B ratios of the control concretes. The 200 mm concrete cube specimens were cast and steel bar with 12 mm in diameter and 50 mm in length was embedded at the covering depths of 10, 20, 50 and 75 mm at the corner of concrete cube specimen. Concrete specimens were cured in fresh water for 28 days, then were placed at the tidal zone of sea water at Chonburi Province. The specimens were tested for chloride penetration and corrosion of embedded steel bars after being exposed to the tidal zone of sea water for 3 years. The results showed that concretes containing fly ash have a better resistance to chloride penetration than that of Portland cement type V and type I concretes. An increase of fly ash replacement in concrete could reduce the chloride penetration and steel corrosion in concrete. In addition, the use of fly ash in Portland cement type V concrete had more seawater corrosion resistance than in Portland cement type I.

Keywords : durability of concrete, chloride penetration, steel corrosion, fly ash, marine environment

บทนำ

ปัจจุบันคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตนอกเหนือจากคุณสมบัติเชิงกล เนื่องจากคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล น้ำกร่อย หรือใกล้ชายฝั่งทะเล มักประสบปัญหาความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของสารเคมี และปัญหาเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเป็นสนิม (Broomfield *et al.*, 1996; Mehta *et al.*, 1991) สาเหตุเหล่านี้เกิดจากน้ำทะเลมีเกลือคลอไรด์ และซัลเฟตละลายอยู่และส่งผลให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับน้ำทะเลนิยมใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เนื่องจาก มีปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ต่ำ จึงลดการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง C_3A กับซัลเฟตที่ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและแตกร้าวในคอนกรีตได้ (Neville, 1996) อย่างไรก็ตาม น้ำทะเลส่วนใหญ่มีคลอไรด์ประมาณร้อยละ 90 และซัลเฟตร้อยละ 10 ดังนั้นจึงควรพิจารณาผลกระทบจากคลอไรด์และซัลเฟตร่วมกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่มีปริมาณ C_3A ต่ำ ถึงแม้จะต้านทานการทำลายเนื่องจากซัลเฟตได้ดี แต่จะมีผลทำให้การทำลายเนื่องจากคลอไรด์มีมากขึ้น เนื่องจากปริมาณ C_3A ที่ต่ำทำให้การดักจับคลอไรด์ที่อยู่ในรูปปฏิกิริยาเคมีกับ C_3A ต่ำลงด้วย และจะปล่อยคลอไรด์อิสระ (free chloride) ที่ส่งผลกระทบต่อการทำลายเหล็กเสริมคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น (Arya *et al.*, 1995; Plang-ngern *et al.*, 1999; Yuan *et al.*, 2009) ด้วยเหตุนี้ การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูง จะช่วยต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A ต่ำ (Rasheeduzzafar *et al.*, 1991) ในขณะเดียวกัน การป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต มีความต้องการปริมาณ C_3A ที่ต่ำ ดังนั้นในการพัฒนาคอนกรีตเพื่อใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเล จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงปริมาณ C_3A ในวัสดุประสานที่เหมาะสม เพื่อป้องกันความเสียหายจากซัลเฟต และคลอไรด์ในน้ำทะเลควบคู่กันไป

การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แม้ว่าต้านทานการกัดกร่อนซัลเฟตได้ดี แต่การต้านทานการเป็นสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ยังน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากมี C_3A น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังนั้นการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอสำหรับการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเป็นการ

เปลี่ยนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ให้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเป็นสารที่มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติในการยึดประสานที่ดี จึงทำให้คอนกรีตมีความทนทานมากขึ้น ตลอดจนการใช้เถ้าถ่านหินมีผลให้ความสามารถในการดักจับคลอไรด์มากขึ้น (Cheewaket *et al.*, 2010) ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่จะทำลายเหล็กเสริมมีปริมาณน้อยลง จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินบางส่วนมีผลให้คอนกรีตสามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากคลอไรด์และลดการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ดี (Chalee *et al.*, 2007; Thomas *et al.*, 2004; Chalee *et al.*, 2009) ดังนั้นการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 บางส่วนจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการพัฒนาคอนกรีตให้มีความคงทนต่อการทำลายเนื่องจากซัลเฟต และคลอไรด์ควบคู่กันไป นั่นหมายถึงคอนกรีตสามารถทนทานจากการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลได้ดีขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเปรียบเทียบผลการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เพื่อช่วยลดผลกระทบเนื่องจากคลอไรด์ และการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมทะเล ซึ่งเป็นการเพิ่มข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่ได้จากการเก็บข้อมูลในสภาพแวดล้อมทะเลในประเทศให้มากขึ้น และเป็นฐานข้อมูลที่ใช้ประกอบการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ให้สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเล ภายใต้ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และความก้าวหน้าทางวิศวกรรมต่อไป

วัตถุประสงค์และวิธีการวิจัย

วัตถุประสงค์

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 5 และเถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 มีอนุภาคที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีปริมาณผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 79.45 และ มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ร้อยละ 0.52 สามารถจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน แสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสาน

ลักษณะทางกายภาพ	วัสดุ		
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5	เถ้าถ่านหิน (F)
Specific Gravity	3.15	3.17	2.23
Retained on a Sieve No.325 (%)	N/A	N/A	32
Mean Particle Size (μm)	25.1	19.2	30.2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	วัสดุประสาน		
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5	เถ้าถ่านหิน (F)
Silicon Dioxide, SiO_2	20.80	21.52	44.95
Aluminium Oxide, Al_2O_3	5.50	3.56	23.70
Iron Oxide, Fe_2O_3	3.16	4.51	10.80
Calcium Oxide, CaO	64.97	66.70	13.80
Magnesium Oxide, MgO	1.06	1.06	3.47
Sodium Oxide, Na_2O	0.08	0.10	0.07
Potassium Oxide, K_2O	0.55	0.24	2.38
Sulfur Trioxide, SO_3	2.96	2.11	1.31
Loss On Ignition, LOI	2.89	1.74	0.52

มวบรวม

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด โดยมีค่ามอดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.71 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 19 มม. และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.74 ร้อยละการของดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดเท่ากับ 0.51 และ 1.00 ตามลำดับ

การเตรียมตัวอย่าง

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.65 และใช้เถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 3 หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม.³ และฝัง

เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 10, 20, 50 และ 75 มม. หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเล จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง คุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณที่นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไปแช่มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9-8.2 และปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000-19,000 มก./ล. ส่วนซัลเฟตระหว่าง 2,200-2,700 มก./ล. และมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 25 ถึง 35 องศาเซลเซียส โดยภาพที่ 1 แสดงการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่สัมผัสสภาวะแวดล้อมทะเล

การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตครบ 3 ปี นำคอนกรีตทรงลูกบาศก์มาทำการเจาะ เพื่อหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้า

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก/ม ³)					
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		เถ้าถ่านหิน (F)	ทราย	หิน	น้ำ
	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5				
I	295	-	-	814	1,039	191
V	-	295	-	814	1,039	192
IF15	251	-	44	814	1,031	191
IF25	221	-	74	814	1,025	191
IF35	192	-	103	814	1,020	191
IF50	132	-	132	814	1,020	191
VF15	-	251	44	814	1,031	192
VF25	-	221	74	814	1,025	192
VF35	-	192	103	814	1,031	192
VF50	-	132	132	814	1,031	192

หมายเหตุ

- “I” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน
- “V” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน
- “F” หมายถึง เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะ
- “15, 25, 35, 50” หมายถึง คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

- “I” หมายถึง คอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- “VF15” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน ในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

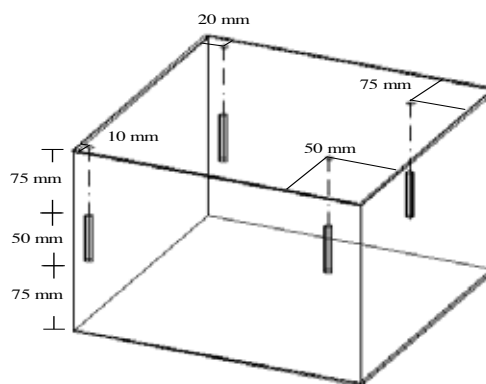
ในคอนกรีต โดยใช้กรดเป็นตัวทำลายตาม ASTM C 1152 ซึ่งได้เป็นปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (total chloride) โดยมีขั้นตอนดังนี้

- เจาะก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ เพื่อทดสอบหาการแทรกซึมของคลอไรด์
- ทำการตัดแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะเป็นชิ้นจากผิวบนไปยังแนวกึ่งกลางโดยในแต่ละชิ้นหนา 10 มม.
- ทำการบดตัวอย่างที่ตัดแต่ละชิ้นให้ละเอียด โดยนำปริมาณกึ่งกลางของแต่ละชิ้นมาบด
- นำตัวอย่างที่ทำการบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 เก็บส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 เพื่อนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์

โดยใช้กรดเป็นตัวทำลายตาม ASTM C 1152 ซึ่งได้เป็นปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (total chloride content) ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ

การทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

หลังจากเจาะตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์แล้วจึงนำคอนกรีตมากดให้แตก เพื่อเก็บเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้มต่างๆ มาสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กในคอนกรีต โดยทำการวัดพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม ด้วยการใช้แผ่นกราฟพลาสติกใสที่มีช่องตารางขนาด 2x2 มม.² ทาบรอบแท่งเหล็กแล้วใช้ปากการะบายพื้นที่ที่เกิดสนิม นับพื้นที่สนิมที่เกิดขึ้น และนำมาเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของแท่งเหล็กทั้งหมด



ก) ตัวอย่างคอนกรีตและตำแหน่งที่ฝังเหล็ก



ข) ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกกลับ



ค) การเจาะและตัดตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

ภาพที่ 1 แสดงการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล

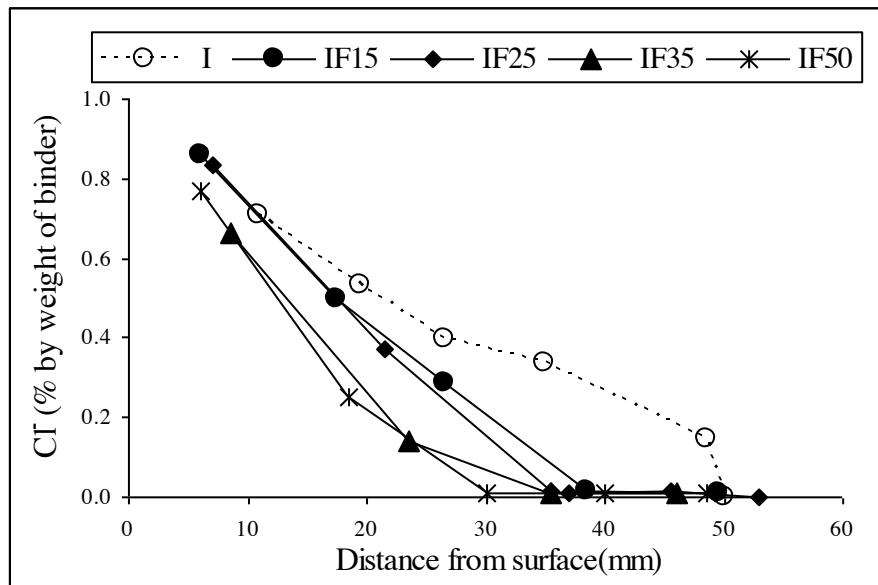
ค่าที่คำนวณได้คือพื้นที่การกัดกร่อนของเหล็ก (ร้อยละของพื้นที่ผิวที่เกิดสนิมเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวทั้งหมดของเหล็ก)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การแทรกซึมของคลอไรด์

ภาพที่ 2 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ระดับความลึกต่างๆ เมื่อแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี พบว่า ที่ระดับความลึก 5 มม. จากผิวหน้าคอนกรีตทุกส่วนผสมมีปริมาณคลอไรด์ค่อนข้างสูง และมีความแปรปรวนของข้อมูล เนื่องจากเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตซึ่งได้รับผลกระทบทั้งทางกายภาพและเคมีของน้ำทะเลสูง ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ถึงผลของการใช้

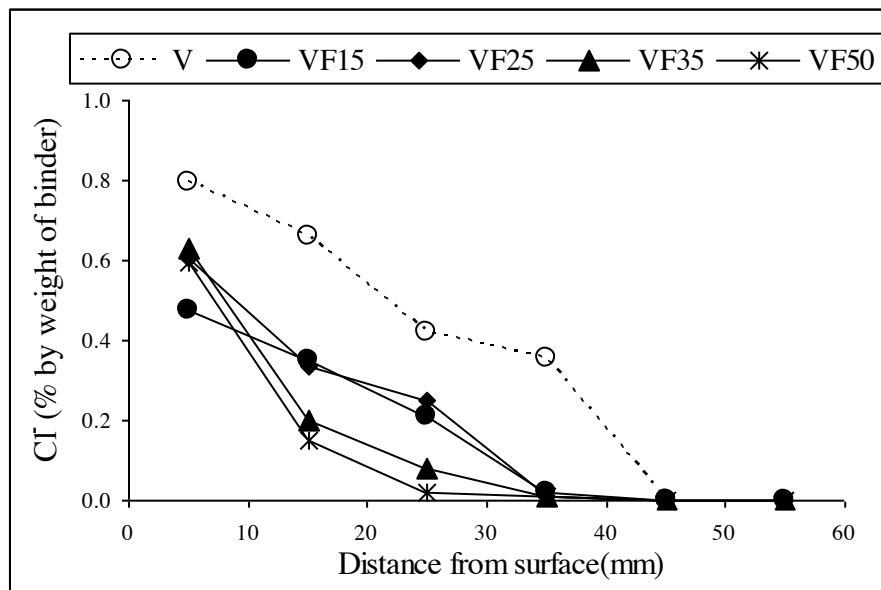


ภาพที่ 2 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าถ่านหินเมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี

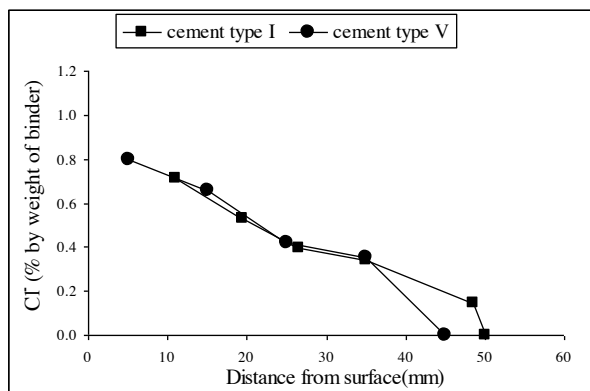
เถ้าถ่านหินต่อแนวโน้มของปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกดังกล่าวได้ชัดเจน แต่ที่ระดับความลึกที่มากขึ้นพบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีแนวโน้มที่ชัดเจนมากขึ้น โดยคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสม พบปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตทุกระดับความลึก มีค่าน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน นั่นแสดงให้เห็นถึงการใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น และส่งผลให้คอนกรีตมีความคงทนมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าถ่านหินช่วยอุดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต และปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างสารประกอบซิลิกาและอลูมินาในเถ้าถ่านหินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ส่งผลให้ลดสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารที่มีความแข็งแรงต่ำลงได้ ตลอดจนได้ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) จากปฏิกิริยาปอซโซลานที่มีคุณสมบัติประสานและช่วยอุดช่องว่างในคอนกรีตลง ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น (Neville, 1996) โดยพบว่าเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น ปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตมีค่าลดลง ส่วนการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหิน (ดังภาพที่ 3) พบว่า การแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้า

ถ่านหินมีแนวโน้มเหมือนกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เถ้าถ่านหินสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ได้ดีเช่นเดียวกับกลุ่มที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

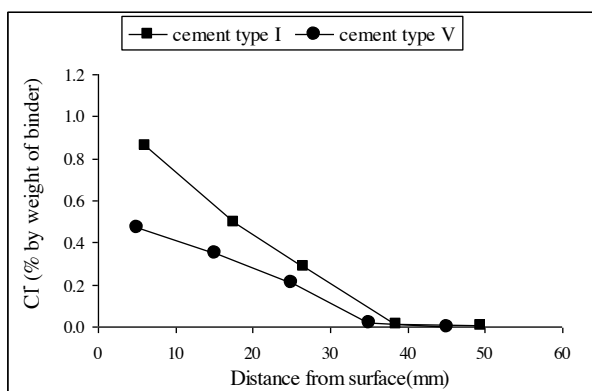
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหิน ดังภาพที่ 4 พบว่า คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน (ภาพ 4ก) มีการแทรกซึมของคลอไรด์หลังแช่น้ำทะเล 3 ปีใกล้เคียงกัน และไม่สามารถวิเคราะห์ถึงแนวโน้มที่ชัดเจนได้ เมื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตโดยการแทนที่เถ้าถ่านหินบางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้ง 2 ชนิด (ภาพที่ 4ข-4ง) พบว่า ที่ปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินที่เท่ากัน คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มที่จะต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าถ่านหินเล็กน้อย การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 สามารถที่จะต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าถ่านหิน อาจเนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เล็กน้อย มีพื้นที่ผิวมากขึ้น



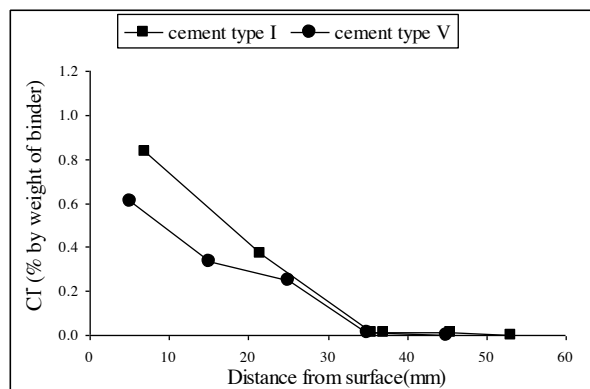
ภาพที่ 3 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินเมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี



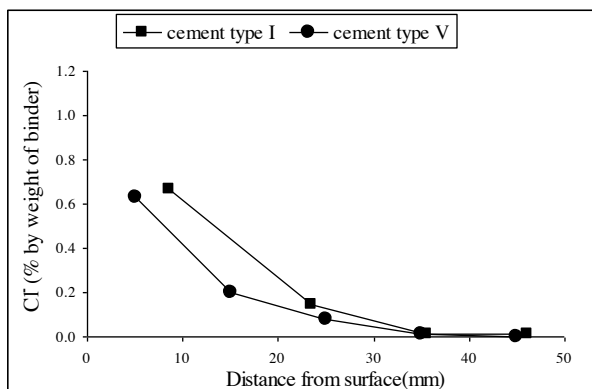
ก) คอนกรีตธรรมดา



ข) ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15



ค) ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 25

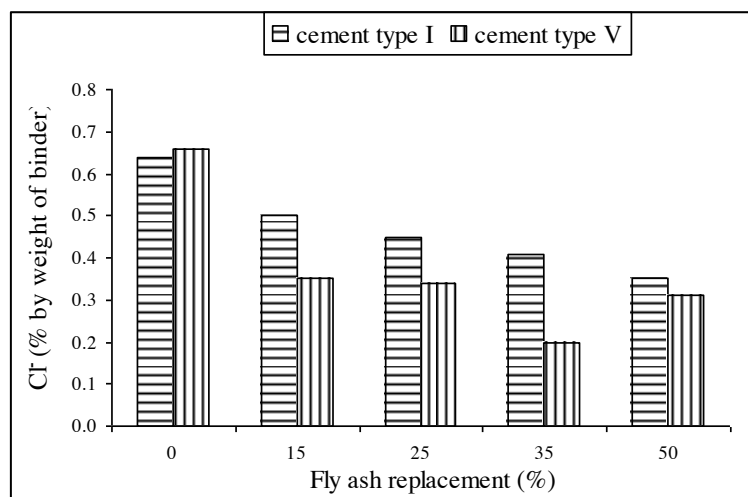


ง) ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 35

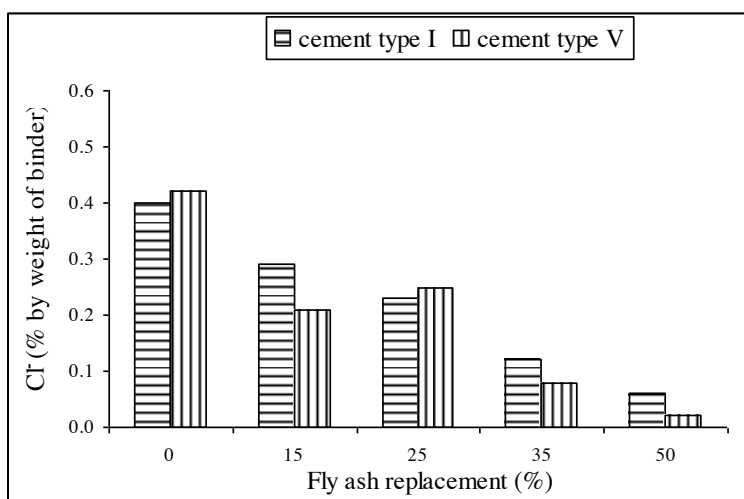
ภาพที่ 4 เปรียบเทียบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินเมื่อแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี

ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่งผลให้ได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ทำให้เกิดการยึดประสานที่ดี รวมทั้งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาดังกล่าวยังเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่อเนื่องกับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหิน ทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตอีกทางหนึ่งด้วย (Gengying *et al.*, 2004; Neville, 1996) และที่สำคัญยิ่งกว่านั้น จากกลไกทางเคมีพบว่า คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่มีผลเถ้าถ่านหิน มีปริมาณ C_3A ที่ต่ำกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีผลเถ้าถ่านหิน ซึ่งทำให้ลดการทำลายเนื่องจากซัลเฟตที่จะก่อให้เกิดการขยายตัวและเกิดโพรงในคอนกรีต ซึ่งอาจส่งผลเกื้อหนุนให้การแทรกซึมของคลอไรด์มีมากขึ้นด้วย

จึงส่งผลให้คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่มีผลเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อยู่ในน้ำทะเลได้ดีกว่า คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีผลเถ้าถ่านหิน อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้ง 2 ชนิดให้ผลค่อนข้างชัดเจนในทิศทางเดียวกันคือ ทำให้คอนกรีตมีความที่บ้น้ำและช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในน้ำทะเลที่เข้าไปทำอันตรายกับเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ดีขึ้น โดยภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ในน้ำทะเลที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระดับความลึก 15 มม. (ภาพ 5ก) และ 25 มม. (ภาพ 5ข) ลดลงอย่างชัดเจน



ก) ระดับความลึก 15 มม.



ข) ระดับความลึก 25 มม.

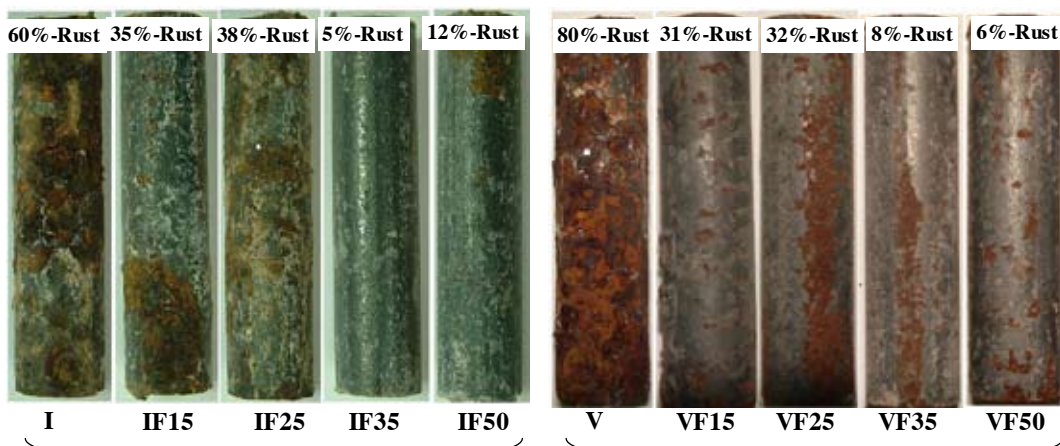
ภาพที่ 5 ผลของถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต เมื่อแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี

เช่น คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 25 มม. เท่ากับ ร้อยละ 0.29, 0.23, 0.12, 0.06 และ 0.21, 0.25, 0.08, 0.02 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ

การกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีต

ภาพที่ 6 (ก) แสดงลักษณะการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม. หลังคอนกรีตแห้งน้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี พบว่า การผสมเถ้าถ่านหินในคอนกรีตสามารถลดการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินได้อย่างชัดเจน และมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งกลุ่มที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 โดยคอนกรีตของปูนซีเมนต์

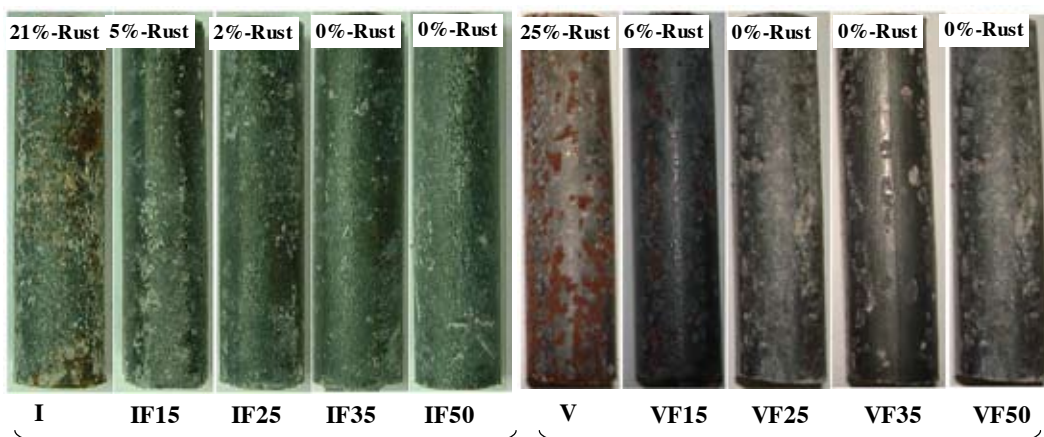
ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน มีร้อยละของพื้นที่ที่เกิดสนิมในเหล็กเท่ากับ 60 และ 80 ของพื้นที่ทั้งหมดตามลำดับ และเมื่อผสมเถ้าถ่านหินในคอนกรีตดังกล่าวในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถลดร้อยละของพื้นที่ของการเกิดสนิมในเหล็กลงเหลือ 35, 38, 5, 12 และ 31, 32, 8, 6 ของพื้นที่ทั้งหมด ตามลำดับ จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินจะเกิดสนิมในเหล็กมากกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นผลจากปริมาณ C_3A ที่สูงในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สามารถยึดจับเกลือคลอไรด์บางส่วนและปล่อยคลอไรด์อิสระ มาทำลายเหล็กเสริมได้น้อยลง (Rasheeduzzafar *et al.*, 1991) อย่างไรก็ตาม



Type I + เถ้าถ่านหินแม่เมาะ, แชน้ำทะเล 3 ปี

Type V + เถ้าถ่านหินแม่เมาะ, แชน้ำทะเล 3 ปี

ก) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม.



Type I + เถ้าถ่านหินแม่เมาะ, แชน้ำทะเล 3 ปี

Type V + เถ้าถ่านหินแม่เมาะ, แชน้ำทะเล 3 ปี

ข) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม.

ภาพที่ 6 ลักษณะการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเมื่อแช่น้ำทะเล 3 ปี

การเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม. ในทุกส่วนผสมเกิดขึ้นค่อนข้างสูงและมีความแปรปรวนของผลการศึกษา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม. มีการทำลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลได้อย่างรวดเร็ว โดยเหล็กเสริมคอนกรีตสามารถถูกทำลายได้เมื่อสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี ผลของเถ้านหินต่อการป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตสามารถวิเคราะห์ได้ชัดเจนมากขึ้นที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม. ตามภาพที่ 6 (ข) ซึ่งพบว่า การใช้เถ้านหินให้ผลในการป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตได้ค่อนข้างชัดเจน และการเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้านหินในปริมาณที่สูงขึ้น ก็ยังส่งผลดีต่อการเกิดสนิมในเหล็กลดลงและมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งกลุ่มที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ทั้งนี้เป็นผลมาจากการใช้เถ้านหินผสมในคอนกรีตมากขึ้น ส่งผลให้การแทรกซึมของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ลดลง รวมทั้งการดักจับคลอไรด์มีมากขึ้นซึ่งช่วยลดปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ที่ทำให้เกิดสนิมในเหล็กได้ (Cheewaket *et al.*, 2010; Yuan *et al.*, 2009)

เมื่อเปรียบเทียบการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ที่ผสมเถ้านหินเมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี พบว่ามีสนิมเหล็กเกิดขึ้นใกล้เคียงกันและไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนในคอนกรีตทั้ง 2 กลุ่ม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาโดยภาพรวมแล้ว คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้านหิน มีแนวโน้มของการเกิดสนิมน้อยกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้านหินในอัตราส่วนเดียวกันเล็กน้อย และเป็นแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกับการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้เถ้านหินในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ให้ผลดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ด้วยเถ้านหินทุกสัดส่วนผสม มีการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมในเหล็กเสริมน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้านหินอย่างชัดเจน
2. การแทนที่เถ้านหินในคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมในเหล็กเสริมเนื่องจากน้ำทะเลลดลง

3. คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้านหินมีแนวโน้มต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ และลดการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้านหิน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 12/2553

เอกสารอ้างอิง

- ASTM. (2008). *Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete, C1152 M-04E01*. Annual Book of ASTM Standards; 04.02.
- ASTM. (1997). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, fly ash, natural pozzolan, pozzolans, C618*. Annual Book of ASTM Standards; 04.01.
- Arya, C. & Xu, Y., (1995). Effect of Cement Type on Chloride Binding and Corrosion of Steel in Concrete. *Cement and Concrete Research*, 25, 893-902.
- Asheeduzzafar, Hussain, S.E. & Al-Saadoun, S.S., (1991). Effect of Cement Composition on Chloride Binding and Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete. *Cement and Concrete Research*, 21(5), 777-794.
- Broomfield, J.P., (1996). *Corrosion of Steel in Concrete*, England, Taylor & Francis Ltd.
- Chalee, W., Teekavanit, M., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A. & Jaturapitakkul, C., (2007). Effect of W/C Ratio on Covering Depth of Fly Ash Concrete in Marine Environment. *Construction and Building Materials*, 21, 965-971.
- Chalee, W., Jaturapitakkul, C. & Chindapasirt P., (2009). Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater. *Marine Structures*, 22, 341-353.
- Cheewaket, T., Jaturapitakkul, C., & Chalee, W., (2010). Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment. *Construction and Building Material*, 24, 1352-1357.

- Gengying, Li., (2004). Properties of High-Volume Fly Ash Concrete Incorporating Nano-SiO₂. *Cement and Concrete Research*, 33, 425-431.
- Mehta, P.K., (1991). *Concrete in the Marine Environment*, 1st ed., England, Taylor & Francis Ltd.
- Neville, A.M., (1996). *Properties of Concrete*, 4th ed., England, Addison Wesley.
- Plang-ngern, S., & Tangtermsirikul, S., (1999). Chloride Binding Capacity in Fly Ash Concrete. *Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand*, 10, 1-8.
- Thomas, M.D.A. & Matthews, J.D., (2004). Performance of pfa Concrete in a Marine Environment-10-year Results. *Cement and Concrete Composites*, 26, 5-20.
- Yuan, Q., Shi, C., Schutter, G.D., Audenaert, K., Deng, D., (2009). Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment – A review. *Construction and Building Material*, 23, 1-13.