

**การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็ก
ในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหิน
ที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดและพุลเวอร์ไรซ์ ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล**
**Chloride Penetration and Steel Corrosion in
Portland Cement Type V Concrete Containing Fly Ash from
Fluidized-bed and Pulverized Combustions under Marine Exposure**

ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ¹ และ วิเชียร ชาลี^{2*}
Piyapong Suwanmaneechot¹ and Wichian Chalee^{2*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษา กำลังอัด การแทรกซึมคลอไรด์ และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหิน จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด (FC) และพุลเวอร์ไรซ์ (PC) หลังจากแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง เถ้าถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดนำมาบด ละเอียดให้ค่าตะแกรงเบอร์ 325 ประมาณร้อยละ 2-5 โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้าถ่านหินจากการเผาแบบพุลเวอร์ไรซ์ นำมาใช้จากโรงงานโดยตรง แทนที่เถ้าถ่านหินใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.65 ทำการ หล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200 x 200 x 200 มม.³ เพื่อฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ให้มีระยะหุ้มของคอนกรีตหนาเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. นอกจากนั้น ได้หล่อตัวอย่าง คอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม.

สูง 200 มม. สำหรับทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และ หลังแช่น้ำทะเล 5 ปี หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำจน มีอายุครบ 28 วัน จึงนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำทะเล บริเวณ จ.ชลบุรี ในสภาวะเปียกสลับแห้ง ทดสอบกำลัง อัด ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และการกัดกร่อนของเหล็ก เสริมในคอนกรีตเมื่อแช่น้ำทะเลครบ 5 ปี ผลการศึกษา พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินจากการเผาแบบพุลเวอร์ไรซ์ ให้ผลในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่า เถ้าถ่านหินบดละเอียดจากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินทุกกลุ่มสามารถต้านทาน การแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กได้ดีกว่า คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ได้ ผสมเถ้าถ่านหิน และการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณ ที่มากขึ้น (ไม่เกินร้อยละ 35) สามารถลดการแทรกซึม ของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กลงได้ นอกจากนั้น คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบ พุลเวอร์ไรซ์ มีการพัฒนากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด

¹ อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

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

คำสำคัญ: การเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด การเผาแบบ
พุลเวอร์ไรซ์ สิ่งแวดล้อมทะเล เถ้าถ่านหิน
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 การแทรกซึม
คลอไรด์ การกัดกร่อนเหล็ก

Abstract

In this study, compressive strength, chloride penetration, and corrosion of embedded steel bars in Portland cement type V concrete containing fly ash from fluidized-bed (FC) and pulverized combustions (PC) under marine site were investigated. Fly ash obtained from fluidized-bed combustion was ground into small particles until about 2-5% by weight were retained on a sieve No.325. Fly ash from pulverized combustion was obtained directly from the power plants. The fly ashes were used to replace Portland cement type V at the percentages of 0, 15, 25, 35 and 50 by weight of binder. A water to binder (W/B) ratio of concrete was kept constant at 0.65. The 200 x 200 x 200 mm³ concrete cube specimens were cast and steel bar of 12-mm in diameter and 50-mm in length were embedded at coverings of 10, 20, 50, and 75 mm in concrete specimens. The cylindrical specimen with 100-mm in diameter and 200-mm in height were also cast for the strength test at 28 days of curing and 5-year exposure in marine site. Concrete specimens were cured in fresh water for 28 days and then were placed at the tidal zone of sea water in Chonburi Province. The specimens were tested for compressive strength, total chloride penetration and corrosion of embedded steel bars after being exposed to the tidal zone of sea water for 5 years. The results showed that the concrete containing fly ash from pulverized combustions resisted chloride better than that containing ground fly ash from fluidized-bed combustions. All fly ash concrete could resist

chloride and steel corrosion better than Portland cement type V concrete could. An increase of fly ash replacement in concrete (not more than 35%) could reduce chloride penetration and steel corrosion in concrete. In addition, compressive strength development of concrete containing fly ash from pulverized combustion was higher than that of concrete containing fly ash from fluidized-bed combustion.

Keywords: Fluidized-bed Combustion, Pulverized Combustion, Marine Environment, Fly Ash, Portland Cement Type V Chloride Penetration, Steel Corrosion

1. บทนำ

ความคงทนของคอนกรีตเสริมเหล็กจะขึ้นกับส่วนผสมคอนกรีต คุณภาพงานก่อสร้าง การบ่มคอนกรีต ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก ตลอดจนสิ่งแวดล้อมที่คอนกรีตสัมผัส [1],[2] คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล น้ำกร่อย หรือใกล้ชายฝั่งทะเล มักประสบปัญหาความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของสารเคมีต่อเนื้อคอนกรีตและเหล็กเสริม การทำลายเนื้อคอนกรีตเป็นผลจากซัลเฟตในน้ำทะเลที่ทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวส่งผลให้แตกร้าว โดยคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูงจะเป็นสารตั้งต้นที่ส่งผลให้การทำลายเนื่องจากซัลเฟตรุนแรงมากขึ้น [3],[4] ดังนั้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับน้ำทะเลจึงนิยมใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เนื่องจากมีปริมาณ C_3A ไม่เกินร้อยละ 5 ซึ่งจะลดการทำลายเนื่องจากซัลเฟตลงได้ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลมีเกลือคลอไรด์ที่กระตุ้นให้เกิดการทำลายเหล็กเสริมค่อนข้างรุนแรง โดยปริมาณ C_3A ที่ต่ำในวัสดุประสานทำให้การดักจับคลอไรด์จากน้ำทะเลได้น้อยและส่งผลให้คลอไรด์อิสระที่กระตุ้นให้เหล็กเสริมเป็นสนิมมีมากขึ้น [5] ดังนั้นส่วนผสมคอนกรีตที่ออกแบบเพื่อใช้งานใน

สิ่งแวดล้อมทะเล จำเป็นต้องพิจารณาวัสดุประสานที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถต้านทานการทำลายทั้งคลอไรด์และซัลเฟตควบคู่กันไป ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมา [6], [7] พบว่าการใช้เถ้านหินที่มีคุณภาพดีแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วน ให้ผลในการต้านทานการทำลายเนื่องจากซัลเฟตและคลอไรด์ได้ดี ดังนั้นการใช้เถ้านหินแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 น่าจะเป็นการนำคุณสมบัติที่ดีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากเกลือซัลเฟตได้ดี ร่วมกับคุณสมบัติที่ดีของเถ้านหินที่ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีด้วย

การใช้เถ้านหินในงานคอนกรีตมีมากขึ้น ทั้งที่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้คอนกรีตมีราคาถูกลง หรือการใช้ในงานเฉพาะด้านที่ต้องการปรับปรุงคุณสมบัติให้เป็นไปตามที่ต้องการ เช่น ลดการแตกร้าว ลดการขยายตัว ลดความร้อนในคอนกรีตและเพิ่มความคงทนให้กับคอนกรีตที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง เป็นต้น การใช้เถ้านหินในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้เถ้านหินคุณภาพดีมีปริมาณจำกัดอาจไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานได้

เถ้านหินที่ได้จากการเผาเถ้านหินแบบฟูลเวอร์ไรซ์ (Pulverized Coal Combustion) ใช้อุณหภูมิของการเผาเถ้านหินในช่วง 1,100 - 1,400 องศาเซลเซียส เถ้านหินที่ได้จะมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน มีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous Phase) บ่งบอกถึงความไม่เป็นระเบียบของการจัดเรียงโครงสร้างอะตอม ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและเหมาะสมสำหรับใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อหล่อคอนกรีต [7], [8] จากการศึกษาที่ผ่านมา [9]-[11] พบว่า เถ้านหินจากแม่เมาะ ซึ่งได้จากการเผาในระบบฟูลเวอร์ไรซ์ สามารถทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติด้านความคงทนดีขึ้น ตลอดจนมีความต้องการเพื่อใช้งานในเชิงพาณิชย์มากขึ้น จึงมีแนวโน้มที่จะทำให้ปริมาณเถ้านหินไม่เพียงพอในการนำมาใช้งาน ส่วนเถ้านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized-bed Coal Combustion) เป็นการเผาเถ้านหินที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำคือไม่เกิน 900

องศาเซลเซียส เถ้านหินที่ได้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular Shape) และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง [7], [8] ซึ่งแม้จะสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานได้แต่อาจด้อยกว่าเถ้านหินที่ได้จากการเผาแบบฟูลเวอร์ไรซ์ จากการศึกษาที่ผ่านมา [12], [13] พบว่าการนำเถ้านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่บดละเอียดมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วน ส่งผลให้คอนกรีตมีคุณสมบัติเชิงกลพื้นฐานไปในทิศทางที่ดี และน่าจะทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้านหินนี้สามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเลได้ดีด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของการใช้เถ้านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (FC) และฟูลเวอร์ไรซ์ (PC) ที่มีในประเทศแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพื่อด้านทานการทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล ซึ่งสามารถเป็นข้อมูลทางเลือกให้กับการใช้ประโยชน์จากเถ้านหินในคอนกรีตที่มีการก่อสร้างในสภาวะแวดล้อมทะเลให้มากขึ้น ตลอดจนเป็นการขยายฐานการใช้งานในเถ้านหินที่เผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดให้เป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ นอกจากนั้นการเก็บข้อมูลในสภาพแวดล้อมทะเลจริงที่ระยะเวลาจนถึง 5 ปี จะทำให้ได้ข้อมูลที่ชัดเจนและมั่นใจในการนำไปใช้งานมากขึ้น

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสานและมวลรวม

วัสดุประสานได้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และเถ้านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (FC) และแบบฟูลเวอร์ไรซ์ (PC) โดยเถ้านหินที่ผ่านการเผาแบบฟูลเวอร์ไรซ์ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 มีอนุภาคที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 [14] ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (เถ้านหินจาก โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า เอ็น พี เอส) ผ่านการบดละเอียดให้ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ประมาณ

ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.35 สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไธซ์เบดและพุลเวอร์ไรซ์ มีปริมาณผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 65.41 และ 72.51 ตามลำดับ แม้ว่าปริมาณผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ของเถ้านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไธซ์เบดจะอยู่ในช่วงร้อยละ 50 ถึง 70 แต่เนื่องจากมีปริมาณ LOI เท่ากับร้อยละ 25.0 ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 6 ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [14] จึงไม่สามารถจัดเถ้านหินนี้อยู่ในเถ้านหิน Class F และ Class C ได้ ส่วนเถ้านหินที่ได้จากการเผาแบบพุลเวอร์ไรซ์ มีปริมาณผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 72.51 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.07 สามารถจัดเป็นเถ้านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [14] โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5	เถ้านหิน	
		FC	PC
Silicon Dioxide, SiO_2	21.52	46.7	36.02
Aluminum Oxide, Al_2O_3	3.56	12.85	20.58
Iron Oxide, Fe_2O_3	4.51	5.91	15.91
Calcium Oxide, CaO	66.70	4.17	18.75
Magnesium Oxide, MgO	1.06	-	-
Sodium Oxide, Na_2O	0.10	0.14	0.69
Potassium Oxide, K_2O	0.24	1.07	1.69
Sulfur Trioxide, SO_3	2.11	0.77	2.24
Loss On Ignition, LOI	1.74	25.06	0.07

มวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 19 มม. และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.85 ส่วนมวลรวมละเอียดมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.95 ซึ่งสอดคล้องกับค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบที่มีค่าระหว่าง 5.5-8.5 และมวล

รวมละเอียดมีค่าระหว่าง 2.2-3.1 [15] ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C127-88 [16] และ C128-93 [17] โดยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดของมวลรวมหยาบและละเอียดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.72 และ 2.61 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของมวลรวม

การทดสอบ	มวลรวม	
	มวลรวม หยาบ	มวลรวม ละเอียด
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.72	2.61
Apparent Specific Gravity	2.74	2.65
Absorption (%)	0.43	0.90
Fineness Modulus	6.85	2.95
Maximum Size (mm)	20	N/A

Remark: N/A = Not applied

2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

คอนกรีตที่ใช้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.65 โดยใช้เถ้านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไธซ์เบด (FC) และพุลเวอร์ไรซ์ (PC) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 3 ทำการหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ทำการหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200 x 200 x 200 มม.³ เพื่อฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ให้มีระยะหุ้มของคอนกรีตหนาเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมในเหล็กเสริม หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำประปามีอายุครบ 28 วันจึงนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลบริเวณชายหาดโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ในสภาวะเปียกสลับแห้ง

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วน ผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก/ม ³)					
	ปูนซีเมนต์ ประเภท 5	เถ้าถ่านหิน		ทราย	หิน	น้ำ
		FC	PC			
V	295	-	-	814	1039	192
VFC15	251	44	-	814	1025	192
VFC25	221	74	-	815	1017	192
VFC35	192	103	-	815	1009	192
VFC50	148	148	-	815	996	192
VPC15	251	-	44	815	1039	187
VPC25	221	-	74	815	1039	187
VPC35	192	-	103	815	1039	186
VPC50	148	-	148	815	1039	172

หมายเหตุ

V คือคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน

FC และ PC คือเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไอดีเบดและแบบฟลูอิดเวอรี่ซ์ ตามลำดับ

15, 25, 35, 50 คือคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

2.2.2 ทดสอบกำลังอัด

ทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. ที่อายุ 28 วัน และทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

2.2.3 ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

นำตัวอย่างทรงลูกบาศก์มาเจาะบริเวณกึ่งกลางและนำแท่งตัวอย่างที่เจาะมาตัดที่ระดับความลึกต่างๆ แล้ววัดให้ละเอียดและนำผงตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ที่ความลึกต่างๆ มาทดสอบปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble Chloride) ตาม ASTM C 1152 [18] เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์อิสระ (Total Chloride Content) ที่ระดับความลึกใดๆ จากผิวคอนกรีต

2.2.4 ทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

นำตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200 x

200 x 200 มม.³ ที่ผ่านการเจาะด้วยหัวเจาะขนาด 50 มม. มากดให้แตกด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Universal Testing Machine) เพื่อเก็บเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้มต่างๆ มาสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กในคอนกรีต ทำการวัดพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิมโดยใช้แผ่นกราฟพลาสติกสีที่มีช่องตารางขนาด 2 x 2 มม.² ทาบรอบแท่งเหล็กและใช้ปากการะบายพื้นที่ที่เกิดสนิม นับพื้นที่สนิมที่เกิดขึ้นและเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของแท่งเหล็กทั้งหมด คำนวณพื้นที่การกัดกร่อนของเหล็กในรูปของร้อยละของพื้นที่ผิวที่เกิดสนิมเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวทั้งหมดของเหล็กดังสมการที่ 1 รวมทั้งใช้ภาพถ่ายสนิมเหล็กประกอบในการวิเคราะห์การกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

$$R, (\%) = \left(\frac{A_R}{A} \right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ $R, (\%)$ คือร้อยละของพื้นที่ผิวที่เกิดสนิมเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวทั้งหมดของเหล็ก

A_R คือพื้นที่ผิวของเหล็กบริเวณที่เกิดสนิม

A คือพื้นที่ผิวทั้งหมดของเหล็ก

2.3 คุณสมบัติของน้ำทะเล

คุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณที่นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9-8.2 และปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000-19,000 มก./ล. ส่วนซัลเฟตระหว่าง 2,200-2,600 มก./ล. โดยผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำทะเลที่ช่วงเวลาต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของน้ำทะเล

Parameters	April 2004	Feb 2005	May 2008	Sep 2009	April 2010
Chloride, Cl ⁻ (mg/l)	16,000	18,000	17,500	18,120	18,910
Sulfate, SO ₄ ²⁻ (mg/l)	2,500	2,200	2,300	2,250	2,610
pH	8.2	8.2	8.1	8.2	8.1

3. วิเคราะห์ผลการศึกษา

3.1 กำลังอัดของคอนกรีต

พิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดเกือบทุกส่วนผสมมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม (V) ซึ่งอาจเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นต่ำในช่วงต้น [1], [7] อย่างไรก็ตาม คอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้านหินในอัตราส่วนร้อยละ 25 (VFC25) มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 337 กก./ซม.² ซึ่งสูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ได้ผสมเถ้านหินเล็กน้อย นอกจากนี้เมื่อแทนที่เถ้านหินในปริมาณที่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ 35 และ 50) ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตมีค่าลดลง ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินที่ได้จากการเผาแบบฟูลเวอร์ไรซ์มีแนวโน้มเหมือนกับคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด กล่าวคือเมื่อแทนที่เถ้านหินเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้กำลังอัดมีค่าลดลงอย่างชัดเจน โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินทุกส่วนผสมมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม (V) ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการเกิดกำลังของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินที่ได้จากการเผาทั้ง 2 แบบ มีลักษณะเหมือนกัน คือเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำในช่วงต้น และปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างซิลิกาและอลูมินาในเถ้านหินกับด่างในคอนกรีตต่อเนื่อง เมื่ออายุคอนกรีตนานขึ้น ดังนั้นการที่ กำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมเถ้านหินที่ได้จากการเผาทั้ง 2 แบบในปริมาณสูงขึ้น เป็นผลจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีปริมาณน้อยลง ประกอบกับปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นยังไม่สมบูรณ์ การศึกษาค้นนี้พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน FC มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันสูงสุดที่การแทนที่เถ้านหินร้อยละ 25 โดยให้กำลังอัดเท่ากับ 337 กก./ซม.² ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน PC ทุกส่วนผสม (คอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้านหิน PC อัตราส่วนร้อยละ 35 มีค่ากำลังอัด

สูงสุดเท่ากับ 324 กก./ซม.²) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเถ้านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดถึงแม้จะมีอนุภาคหยาบ มี LOI สูง และมีความพรุนสูง เมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้ละเอียด ก็สามารถพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงแรกสูงกว่าเถ้านหินจากการเผาแบบฟูลเวอร์ไรซ์ได้ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพ พบว่าเถ้านหิน FC ที่ผ่านการบดมีขนาดอนุภาคที่ละเอียด (ค่ากระจายเบอร์ 325 ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก) กว่าเถ้านหิน PC (ค่ากระจายเบอร์ 325 ร้อยละ 32 โดยน้ำหนัก) ค่อนข้างมาก จึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงต้นเกิดขึ้นได้เร็ว [12], [13] และมีกำลังอัดที่สูง อย่างไรก็ตาม คอนกรีตที่ผสมเถ้านหินที่ได้จากการเผาทั้งสองแบบให้กำลังอัดที่อายุ 28 วันไม่ต่างกันมาก โดยปริมาณการแทนที่เถ้านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่เหมาะเพื่อให้ได้กำลังอัดสูงสุดคือเท่ากับร้อยละ 25 และ 35 สำหรับเถ้านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดและแบบฟูลเวอร์ไรซ์ ตามลำดับ

ตารางที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุบ่มในน้ำ 28 วัน และหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ส่วนผสม	กำลังอัด (กก/ซม. ²)		ร้อยละกำลังอัดที่ 5 ปี เทียบกับ 28 วัน
	28 วัน	แช่น้ำทะเล 5 ปี	
V	333	403	121.0
VFC15	320	434	135.6
VFC25	337	428	127.1
VFC35	313	406	129.7
VFC50	219	327	149.1
VPC15	319	439	137.7
VPC25	321	444	138.2
VPC35	324	445	137.3
VPC50	257	405	157.5

เมื่อพิจารณากำลังอัดคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี (ตารางที่ 5) พบว่าคอนกรีตทุกส่วนผสมมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 28 วัน โดยคอนกรีตที่

ผสมเถาถ่านหินที่ได้จากการเผาทั้ง 2 แบบในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งโดยภาพรวมแล้วคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหิน PC มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหิน FC ค่อนข้างชัดเจน เช่น การแทนที่เถาถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไรซ์ในคอนกรีตร้อยละ 15, 25, 35, และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้กำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี เท่ากับ 439, 444, 445 และ 405 กก./ซม.² ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตกลุ่มเดียวกันนี้ เมื่อแทนที่ด้วยเถาถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไรซ์เบดให้กำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี เท่ากับ 434, 428, 406 และ 327 กก./ซม.² ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตหลังจากแช่น้ำทะเลครบ 5 ปี (ตารางที่ 5) พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหินทั้ง 2 กลุ่ม มีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดจาก 28 วัน จนถึงหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี สูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ได้ผสมเถาถ่านหิน โดยคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหิน PC มีการพัฒนากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหิน FC ซึ่งอาจเป็นผลจากเถาถ่านหิน PC มีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าเถาถ่านหิน FC ตลอดจนลักษณะอนุภาคที่กลมตัน ของเถาถ่านหิน PC ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในระยะยาวดีขึ้น [19] โดยกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไรซ์เบดร้อยละ 15, 25, 35, และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่าเท่ากับร้อยละ 135.6, 127.1, 129.7 และ 149.1 ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตกลุ่มเดียวกันนี้ เมื่อแทนที่ด้วยเถาถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไรซ์ มีร้อยละของกำลังอัดที่ 5 ปี เทียบกับ 28 วัน เท่ากับ 137.7, 138.2, 137.3 และ 157.5 ตามลำดับ

การศึกษาครั้งนี้พบว่า คุณสมบัติทางเคมีและอนุภาคที่กลมตันของเถาถ่านหิน PC มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในระยะยาวหลังแช่น้ำทะเลมากกว่าความละเอียดของเถาถ่านหิน โดยสังเกตได้ว่าถึงแม้

เถาถ่านหิน FC จะผ่านการบดละเอียด (ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก) และมีอนุภาคที่เล็กกว่าเถาถ่านหิน PC (ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 โดยน้ำหนัก) อย่างมาก แต่กลับมีการพัฒนากำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลได้ต่ำกว่าเถาถ่านหิน PC ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า คอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไรซ์ให้ผลในการต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลในแง่ของคุณสมบัติเชิงกลได้ดีกว่าเถาถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไรซ์เบด อย่างไรก็ตาม กำลังอัดของคอนกรีตทั้งสองกลุ่มมีค่าค่อนข้างสูงถึงแม้ว่าจะผ่านการแช่น้ำทะเลมาถึง 5 ปี จึงสามารถใช้เป็นคอนกรีตเพื่อรองรับการทำลายทางกายภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้

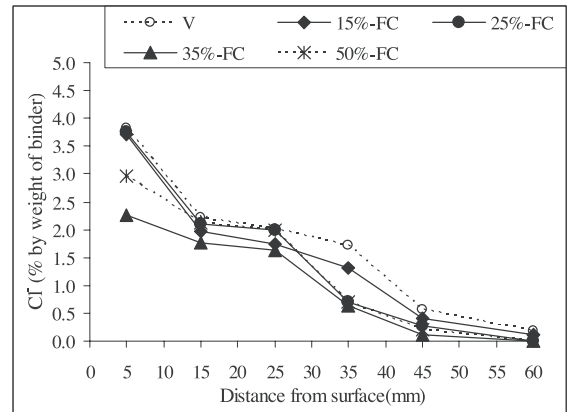
การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 บางส่วนด้วยเถาถ่านหินทั้งสองกลุ่ม ในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 50 มีการพัฒนากำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงที่สุดเมื่อเทียบกับทุกกลุ่มการแทนที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหินทั้งสองกลุ่มในปริมาณมากส่งผลต่อการเพิ่มกำลังอัดในช่วง 5 ปี ที่แช่น้ำทะเลค่อนข้างชัดเจน อย่างไรก็ตาม การใช้เถาถ่านหินปริมาณสูงในคอนกรีตมีผลให้กำลังอัดในช่วงต้นค่อนข้างต่ำ ซึ่งโครงสร้างคอนกรีตที่มีการรับแรงเชิงกลโดยเฉพาะแรงดัด อาจเกิดรอยร้าวเล็กๆ ที่ส่งผลให้การทำลายเนื่องจากเกลือคลอไรด์ และซัลเฟตในสิ่งแวดล้อมทะเลในช่วงต้นเกิดได้รวดเร็วยิ่งขึ้น และมีผลทำลายชัดเจนมากขึ้นเมื่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ในสภาวะใช้งานที่อายุนานขึ้น ดังนั้น ถึงแม้ว่าคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหินปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 จะมีการพัฒนากำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วันสูงก็ตาม ก็ไม่เหมาะสมที่จะใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเล

3.2 การแทรกซึมของคลอไรด์

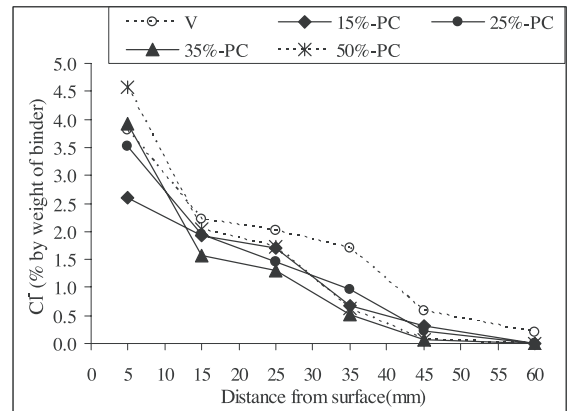
พิจารณาผลของเถาถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไรซ์เบดและแบบฟลูอิดไรซ์ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลถึง 5 ปี ดังแสดง

ในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ พบว่าเถาเถาหินที่ได้จากการเผาทั้งสองแบบสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เข้าไปในคอนกรีตได้อย่างชัดเจน โดยคอนกรีตที่ผสมเถาเถาหินทุกกลุ่มพบการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆ ต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ได้ผสมเถาเถาหิน การแทนที่เถาเถาหินในปริมาณที่มากขึ้นไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้การแทรกซึมคลอไรด์มีแนวโน้มลดลงเหมือนกันทั้งสองกลุ่ม ตลอดจนการใช้เถาเถาหินผสมในคอนกรีตร้อยละ 35 สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีที่สุด อาจเกิดจากคอนกรีตที่ผสมเถาเถาหินไม่เกินร้อยละ 35 มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี ค่อนข้างสูง (มากกว่า 400 กก.ซม.²) ตลอดจนปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้น ทำให้ลดโพรงในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ นอกจากนี้ปฏิกิริยาดังกล่าวยังช่วยลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยเปลี่ยนให้เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้นที่ก่อให้เกิดการทำลายเนื่องจากซัลเฟตในน้ำทะเล โดยจะทำให้เกิดยิบซัมที่ละลายน้ำได้และส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาการใช้เถาเถาหินในปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กลับพบว่า คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถาเถาหินที่ได้จากการเผาทั้งสองแบบมีการแทรกซึมของคลอไรด์มากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากการศึกษาที่ผ่านมาที่พบว่า การแทนที่เถาเถาหินในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 มีผลให้การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีขึ้น [20], [21] การใช้เถาเถาหินปริมาณสูงในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ส่งผลให้การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ต่ำลง อาจเป็นผลจากกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถาเถาหินร้อยละ 50 ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับคอนกรีตกลุ่มอื่น ทั้งนี้เนื่องจากการใช้เถาเถาหินปริมาณสูง เป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์

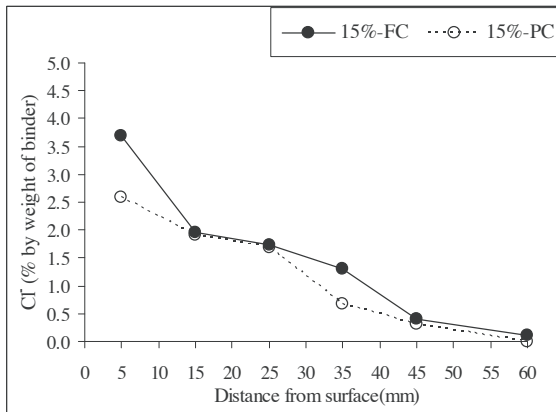


รูปที่ 1 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถาเถาหิน FC หลังแช่น้ำทะเล 5 ปี

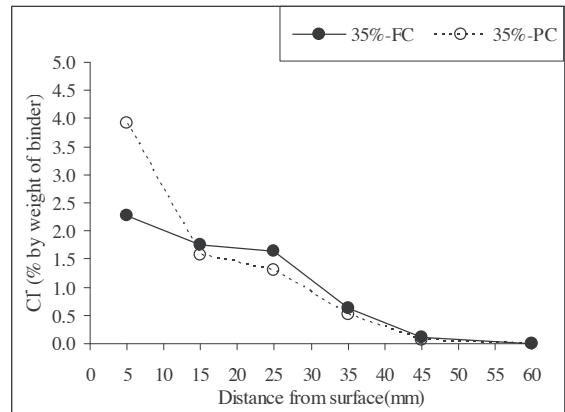


รูปที่ 2 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถาเถาหิน PC หลังแช่น้ำทะเล 5 ปี

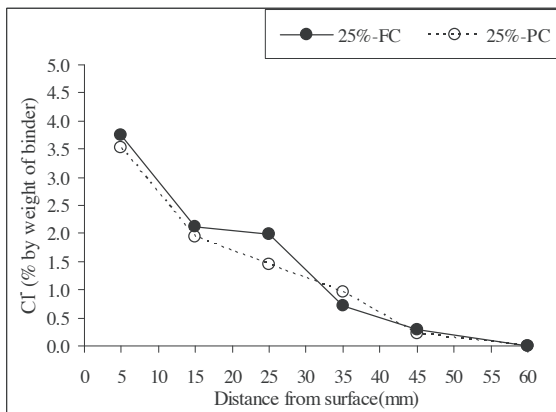
ปอร์ตแลนด์ลง ส่งผลให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งเป็นสารประกอบที่ให้กำลังกับคอนกรีต ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเกิดขึ้นน้อย นอกจากนั้น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันอาจไม่เพียงพอในการเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับเถาเถาหินได้สมบูรณ์ จึงทำให้คอนกรีตมีความพรุนและกำลังอัดต่ำลงได้ ตลอดจนคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงถึง 0.65 จึงทำให้คอนกรีตมีความพรุนและเกลือคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าในคอนกรีตได้ง่ายขึ้น



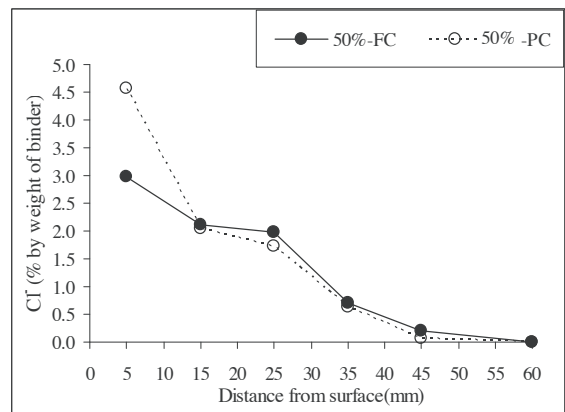
ก) ผสมแก้ถ่านหินร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



ค) ผสมแก้ถ่านหินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



ข) ผสมแก้ถ่านหินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



ง) ผสมแก้ถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

รูปที่ 3 ผลของถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดและแบบพุลเวอร์ไรซ์ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์หลังแช่น้ำทะเล 5 ปี

เมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดและแบบพุลเวอร์ไรซ์ที่ปริมาณการแทนที่ถ่านหินต่าง ๆ ดังรูปที่ 3ก-3ง พบว่าถ่านหินจากการเผาแบบพุลเวอร์ไรซ์มีแนวโน้มที่จะต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด โดยเห็นผลชัดเจนที่ระดับความลึกที่มากขึ้น เช่น คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยวัสดุประสาน พบปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 35 มม.

เท่ากับร้อยละ 1.31, 0.70, 0.63 และ 0.71 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตกลุ่มเดียวกันนี้เมื่อแทนที่ด้วยถ่านหินจากการเผาแบบพุลเวอร์ไรซ์พบปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 35 มม. เท่ากับร้อยละ 0.68, 0.97, 0.52 และ 0.63 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ถ่านหิน PC ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการบดละเอียด แต่สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าถ่านหิน FC ที่ผ่านการบดละเอียด ซึ่งเมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านหินที่ผ่านการเผาทั้งสองแบบ พบว่าถ่านหิน FC มีลักษณะผิวขรุขระ ความพรุนค่อนข้างสูง

รูปร่างไม่แน่นอน มีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง ในขณะที่เถาเถาหิน PC มีลักษณะเป็นทรงกลมตัน ผิวเรียบ มีขนาดใหญ่และเล็กปะปนกัน เนื่องจากอุณหภูมิของการเผาเถาเถาหินบดมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่าง 1,100 ถึง 1,400 องศาเซลเซียส ทำให้เถาเถาหินหลอมเหลวจนเป็นทรงกลมตัน นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาในส่วนขององค์ประกอบทางเคมีดังที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าเถาเถาหิน PC มีผลรวมของสารประกอบออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็ก สูงกว่าเถาเถาหิน FC และมีค่า LOI ต่ำกว่า จึงทำให้คอนกรีตที่ผสมเถาเถาหิน PC มีการเปลี่ยนรูปของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ให้เป็น C-S-H ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถาเถาหิน FC และทำให้คอนกรีตที่ผสมเถาเถาหิน PC สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถาเถาหิน FC ที่อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่เท่ากัน

นอกจากองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะอนุภาคของเถาเถาหิน PC ที่ส่งผลในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าเถาเถาหิน FC ซึ่งมีความละเอียดมากกว่าแล้ว เถาเถาหิน PC ที่มีลักษณะอนุภาคกลมตันและมีขนาดคละกันที่ดีกว่าเถาเถาหิน FC ก็สามารถอุดช่องว่างภายในคอนกรีตได้ดีอีกด้วย [22] และส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีขึ้น

3.3 การกัดกร่อนเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

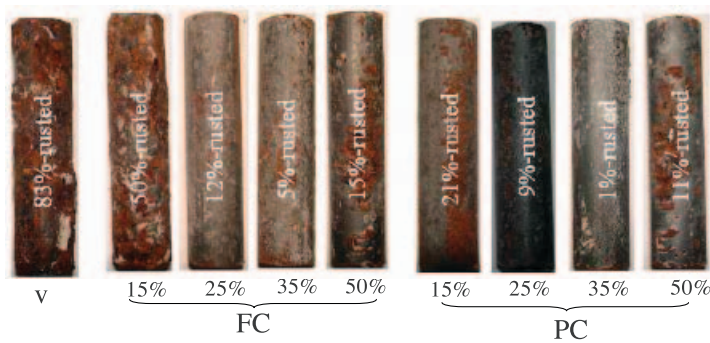
ตารางที่ 6 แสดงร้อยละของพื้นที่ที่เหล็กเกิดสนิมในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถาเถาหิน FC และ PC หลังแช่น้ำทะเล 5 ปี พบว่าการเกิดสนิมในเหล็กที่ระยะหุ้มคอนกรีต 10 และ 20 มม. ของคอนกรีตทุกกลุ่มมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง และมีสนิมเหล็กเกิดขึ้นปริมาณมาก (พื้นที่เกิดสนิมร้อยละ 90-100) จึงไม่สามารถวิเคราะห์ผลของเถาเถาหินต่อการเกิดสนิมได้ชัดเจน เมื่อพิจารณาการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 และ 75 มม. ดังรูปที่ 4(ก) และ 4(ข) ตามลำดับ พบว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถาเถาหินที่ได้จากการเผาทั้งสองแบบเกิดสนิมเหล็กน้อย

กว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ได้ผสมเถาเถาหินอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเถาเถาหินสามารถต้านทานการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตได้ดี ถึงแม้จะสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเลนานถึง 5 ปี ส่วนคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ได้ผสมเถาเถาหิน พบว่าน้ำทะเลสามารถกัดกร่อนเหล็กเสริมคอนกรีตได้ถึงระยะหุ้มเหล็ก 75 มม. โดยพื้นที่เกิดสนิมมีมากถึงร้อยละ 72 ส่วนกลุ่มที่ผสมเถาเถาหินพบ

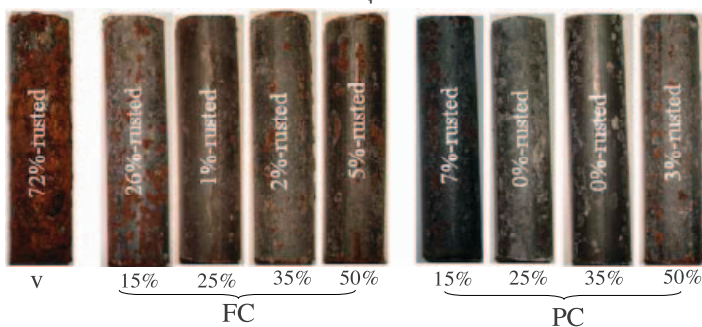
ตารางที่ 6 พื้นที่สนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ส่วนผสม	พื้นที่สนิมเหล็ก (ร้อยละ)			
	ระยะหุ้มเหล็ก 10 มม.	ระยะหุ้มเหล็ก 20 มม.	ระยะหุ้มเหล็ก 50 มม.	ระยะหุ้มเหล็ก 75 มม.
V	99	98	83	72
VFC15	100	96	50	26
VFC25	99	98	12	1
VFC35	98	97	5	2
VFC50	100	99	15	5
VPC15	100	97	21	7
VPC25	100	100	9	0
VPC35	95	90	1	0
VPC50	100	95	11	3

พื้นที่เกิดสนิมไม่เกินร้อยละ 26 ที่ระดับความลึกดังกล่าว จากรูปที่ 4(ก) และ 4(ข) พบว่าการใช้เถาเถาหินให้ผลในการป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตได้ค่อนข้างชัดเจน และการเพิ่มเถาเถาหินในปริมาณที่สูงขึ้นไม่เกินร้อยละ 35 ส่งผลให้การเกิดสนิมในเหล็กลดลง โดยการผสมเถาเถาหินในคอนกรีตร้อยละ 25 ถึง 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กได้ดี และมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งกลุ่มที่ใช้เถาเถาหิน FC และ PC ทั้งนี้เป็นเพราะการใช้เถาเถาหินผสมในคอนกรีต ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride) ลดลง รวมทั้งการดักจับคลอไรด์มีมากขึ้นซึ่งช่วยลดปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) ที่ทำให้เกิดสนิมในเหล็กลงได้ [5] โดยพบว่า



ก) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม.



ข) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 75 มม.

รูปที่ 4 ลักษณะการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน FC และ PC เมื่อแช่น้ำทะเล 5 ปี

การใช้เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาทั้งสองแบบผสมในคอนกรีตร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้ผลในการต้านทานการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ดีที่สุด ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต อย่างไรก็ตามในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินปริมาณมากถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้สนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตมีแนวโน้มมากขึ้น เช่นเดียวกับการแทรกซึมของคลอไรด์ที่มากขึ้น นอกจากนั้น การเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อาจขึ้นกับระดับของปริมาณคลอไรด์วิกฤตอีกด้วย โดยการศึกษาที่ผ่านมา [23] พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้ระดับของคลอไรด์วิกฤตต่ำลง ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตได้เร็วขึ้นอีกด้วย

เมื่อเปรียบเทียบการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหิน

FC และ PC พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการแทรกซึมของคลอไรด์ โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน PC สามารถต้านทานการกัดกร่อนเหล็กเสริมได้ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน FC และมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งที่ระดับความลึก 50 และ 75 มม. เช่น คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยวัสดุประสาน พบพื้นที่สนิมในเหล็กที่ฝังระดับความลึก 50 มม. เท่ากับร้อยละ 50, 12, 5 และ 15 ของพื้นที่ผิวเหล็กทั้งหมด ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตกลุ่มเดียวกันนี้ เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินจากการเผาแบบพุลเวอร์ไรซ์ พบพื้นที่สนิมในเหล็กที่ฝังระดับความลึก 50 มม. เท่ากับร้อยละ 21, 9, 1 และ 11 ของพื้นที่ผิวเหล็กทั้งหมด ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าการใช้เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบพุลเวอร์ไรซ์ที่ไม่ต้องผ่านการบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทที่ 5 ร้อยละ 25-35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถป้องกันการทำลายเหล็กเสริมคอนกรีตเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ดี อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดจะต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้น้อยกว่าถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟูลเวอร์ไรซ์ แต่ผลการทดสอบถึง 5 ปี เป็นที่ยืนยันได้ว่า ถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาทั้งสองแบบสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากน้ำทะเลไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ผ่านการบดละเอียด จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อป้องกันการทำลายของสภาวะแวดล้อมทะเลต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

4. สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่ผสมถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟูลเวอร์ไรซ์ มีการพัฒนากำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี สูงกว่าคอนกรีตที่ผสมถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด

2. คอนกรีตที่ใช้ถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาทั้งสองแบบทุกอัตราส่วนการแทนที่ สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ได้ผสมถ้ำถ่านหิน

3. คอนกรีตที่ผสมถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟูลเวอร์ไรซ์ ให้ผลในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กได้ดีกว่าถ้ำถ่านหินบดละเอียดจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด

4. ปริมาณการแทนที่ถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาทั้งสองแบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ร้อยละ 25-35 ให้ผลต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ การเกิดสนิมเหล็ก และกำลังอัดคอนกรีตไปในทิศทางที่ดี ส่วนการแทนที่สูงถึงร้อยละ 50 ส่งผลให้การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงและการเกิดสนิมเหล็กมีมากขึ้น

5. ถ้ำถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด

ที่ผ่านการบดละเอียด สามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อป้องกันการทำลายของสิ่งแวดล้อมทะเลต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ 2555

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Chindaprasirt and C. Jaturapitakkul, *Cement, Pozzolan and Concrete*, 6th ed, Thailand Concrete Association, 2010 (in Thai).
- [2] J.P. Broomfield, *Corrosion of Steel in Concrete*, England Taylor & Francis Ltd, 1996.
- [3] A.M. Neville, *Properties of Concrete*, 4th ed., England: Addison Wesley, 1996.
- [4] S. Tangtermsirikul, *Durability and mix design of concrete*, 1st ed., Printing house of Thammasat University, 2003.
- [5] T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, "Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment," *Constr Build Mater* 24, pp. 1352-1357, 2010.
- [6] K. Charoenprom and W. Chalee, "Chloride Penetration Depth in Concrete under Marine Exposure," *The Journal of KMUTNB*, vol. 21, no. 3, pp. 257-266, 2011 (in Thai).
- [7] C. Jaturapitakkul and W. Tangchirapat, *Pozzolanic Materials in Concrete*, 2th ed, KMUTT, 2008 (in Thai).
- [8] U. Rattanasak and P. Chindaprasirt, *Rice husk ash in concrete*, 1st ed, Science and Engineering, 2009 (in Thai).
- [9] W. Chalee, M. Teekavanit, K. Kiattikomol, A. Siripanichgorn, and C. Jaturapitakkul, "Effect of

- W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment,” *Constr Build Mater* 21, pp. 965-971, 2007.
- [10] R. Cheerarot and C. Jaturapitakkul, “A study of disposed fly ash from landfill to replace Portland cement,” *Waste Management* 24, pp. 701-709, 2004.
- [11] R. Somna, W. Chalee, and C. Jaturapitakkul, “Effect of Fly Ash from 3 Sources on Strength of Mortar Immersed in Magnesium Sulfate Solution,” in *Annual Concrete and Geopolymer Conference 2*, Khon Kaen, Thailand, September 5-6, pp. 107-112, 2008 (in Thai).
- [12] V. Sata, C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol, “Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete,” *Constr Build Mater* 21, pp. 1589-1598, 2007.
- [13] K. Kiattikomol, C. Jaturapitakkul, S. Songpiriyakij, and S. Shutubtim, “A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources as pozzolanic materials,” *Cem Concr Comp* 23, pp. 335–343, 2001.
- [14] *ASTM. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, C618-03*, Annual Book of ASTM Standards 2003, 04.02.
- [15] *ACI. Guide for Use of Normal Weight Aggregates in Concrete, ACI 221R-89*, ACI Manual of Concrete Practice Part 1, 1992, Detroit, pp. 4.
- [16] *ASTM. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate, C127-88*, Annual Book of ASTM Standards 2001 ;04.02.
- [17] *ASTM. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, C128-93*, Annual Book of ASTM Standards 2001, 04.02.
- [18] *ASTM C1152. Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete*, Annual Book of ASTM Standards, 1999, 04.01.
- [19] W. Chalee, P. Ausapanit, and C. Jaturapitakkul, “Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis,” *Mater Design* 31, pp. 1242-1249, 2010.
- [20] W. Chalee and C. Jaturapitakkul, “Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment,” *Mater Struct* 42, pp. 505-514, 2009.
- [21] S. Rukzon and P. Chindapasirt, “Strength and chloride resistance of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash and fly ash,” *Inter J Minera Metallu Mater* 16, pp. 475-481, 2009.
- [22] J. Tangpagasit, R. Cheerarot, C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol, “Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar,” *Cem Concr Res* 35, pp. 1145–1151, 2005.
- [23] W. Chalee and C. Jaturapitakkul, “Threshold Chloride Content of Fly Ash Concrete under Marine Environment,” *The Journal of Industrial Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 21-28, 2011 (in Thai).