

## การปรับปรุงคุณภาพวัสดุประสานจากเถ้าก้นเตา เพื่อพัฒนาศักยภาพในการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต

### Improving the Quality of Binder from Bottom Ash to Develop the Performance of Corrosion Protection in Reinforced Concrete

ธีรเดช ทัพพะ<sup>1</sup> เพ็ญพิชชา สนิทอินทร์<sup>2</sup> นันทวัฒน์ ขมหวาน<sup>3</sup> ชิชณนพงษ์ สุจัมมะ<sup>4</sup> และ สุบรรณ สนิทอินทร์<sup>5</sup> \*

<sup>1,2,3,4</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม

<sup>5</sup> ศูนย์เครื่องจักรกลการเกษตรแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม

\*Corresponding author; E-mail address: suban.s@ku.ac.th

#### บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งเน้นพัฒนาความสามารถในการรับกำลังและการต้านทานการเกิดสนิมในเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาบางส่วนเป็นวัสดุประสาน ทำการปรับปรุงคุณภาพเถ้าก้นเตาโดยการนำมาร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 30 จากนั้นนำมาบดให้มีความละเอียดข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ประมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (BA) ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีต BA มีกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 และ 28 วัน สูงถึง 394 กก/ซม<sup>2</sup> และ 496 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ โดยสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ได้ถึง 135 กก/ม<sup>3</sup> ผลการทดสอบการเกิดสนิมโดยวิธีเร่งด้วยไฟฟ้าพบว่าการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในคอนกรีต BA มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมถึง 3-4 เท่าโดยประมาณ นอกจากนี้ความสามารถในการต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตอยู่ในระดับที่มีความเป็นไปได้ร้อยละ 90 ที่จะไม่เกิดสนิม รวมทั้งการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมพบว่าการใช้เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุประสานทำให้คอนกรีตเสริมเหล็กมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเพียงร้อยละ 0.46 โดยน้ำหนัก ในขณะที่คอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.55 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมากกว่า ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.09 และ 1.27 โดยน้ำหนักตามลำดับ ด้วยเหตุนี้เถ้าก้นเตาจึงมีศักยภาพสูงที่จะใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: การต้านทานการเกิดสนิมในเหล็กเสริมในคอนกรีต, การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม, เถ้าก้นเตา

#### Abstract

This study focused on the ability of developing strength and corrosion protection in reinforced concrete by using partial

bottom ash as a binder material. Improved the quality of the bottom ash by sieving through a standard sieve No. 30 and then grinding until the particles retained on a sieve No. 325 about 5% by weight to enhance its pozzolanic properties and replacing Portland cement type I at the rate of 35% by weight of binder (BA). The test results showed that the BA concrete had compressive strength at 7 and 28 days of 394 and 496 kg/cm<sup>2</sup>, respectively, which could reduce the cement consumption about 135 kg/m<sup>3</sup>. In the test of the electrical current of the reinforcing steel bar embedding in concrete showed the results of BA concrete was approximately 3-4 times lower than the control concrete. In addition, the ability to resist rust of steel reinforced concrete is at a level with a probability of 90% that it will not rust. Including the test results of weight loss of steel bar, it found that the using bottom ash as binder in concrete had the weight loss of steel bar only 0.46% by weight, while the control concrete at the water to binder ratio of 0.45 and 0.55 had a weight loss of steel high as 1.09% and 1.27% by weight, respectively. As a consequence, this can be clearly stated that the ground bottom ash has a high potential to be used as a pozzolanic material.

Keywords: Bottom ash, Corrosion protection, Weight loss of steel bar

## 1. บทนำ

ในการวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาเอ้ากันเตาในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต เอ้ากันเตาเป็นส่วนเหลือทิ้งจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เช่นเดียวกับเถ้าลอย โดยเอ้ากันเตามีอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่และน้ำหนักที่มากกว่าจึงตกตามแรงโน้มถ่วงลงสู่ก้นเตา เอ้ากันเตาถูกเคลื่อนย้ายออกโดยผ่านสายพานซึ่งมีน้ำคอยชะล้างและหล่อเลี้ยงตลอดความยาวสายพานและจัดเก็บต่อไป ดังนั้นเอ้ากันเตามักอยู่ในสภาพที่เปียกชื้นและสังเกตได้ว่ามีสีที่เข้มกว่า มีขนาดเป็นก้อน คล้ายกรวดและผงคละกันไป หากพิจารณาความแตกต่างระหว่างเถ้าลอยและเอ้ากันเตานอกจากสียังมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีพบว่ามีขนาดแตกต่างกันอยู่เล็กน้อย ซึ่งการที่คอนกรีตต้องเผชิญกับน้ำขึ้นน้ำลงทางทะเล กล่าวคือช่วงน้ำขึ้นจะทำให้คอนกรีตดูดน้ำทะเลเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีต และหากน้ำลงจะทำให้คอนกรีตได้สัมผัสกับอากาศส่งผลให้คอนกรีตทำให้เกิดความชื้นของคลอไรด์ที่ส่งผลให้คอนกรีตเกิดสนิมตามมาและเกิดเป็นรอยแตกร้าวในที่สุด ซึ่งจากงานวิจัยของ [1] และคณะ ที่นำเอ้ากันเตามือถือประกอบทางเคมีที่เหมาะสมแก่การนำมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลาน รวมทั้งคุณสมบัติทางกายภาพของเอ้ากันเตาหลังจากการคัดเลือกและปรับปรุงเอ้ากันเตาแล้วนั้นสามารถพัฒนาคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ในด้านการรับกำลังและความคงทน นอกจากนี้ [2] ศึกษาอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานที่มีผลต่อระยะหุ้มของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสมเท่ากับ 0.65 และใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในอัตราส่วนร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถลดการเกิดสนิมที่เหล็กเสริม และลดระยะหุ้มของคอนกรีตได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสมเท่ากับ 0.45 และ 0.65 และยังสามารลดระยะหุ้มของคอนกรีตลงได้ 20 มิลลิเมตร เมื่อมีการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

การศึกษาค้นคว้านี้มุ่งศึกษาการปรับปรุงคุณภาพเอ้ากันเตาโดยการร่อนเอ้ากันเตาผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 30 จากนั้นนำส่วนที่ผ่านตะแกรงทั้งหมดมาบดให้มีความละเอียดค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ตามมาตรฐาน [3] การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมตามมาตรฐาน [4] และการทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน [5] เปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่ผสมเอ้ากันเตาเป็นวัสดุประสานบางส่วนกับคอนกรีตควบคุม

การนำเอ้ากันเตามาใช้โดยไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพก่อนนั้นอาจส่งผลให้คอนกรีตมีคุณภาพต่ำกว่าที่คาดหวัง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเผชิญกับสภาวะแวดล้อมทางทะเล และโดยปกติแล้วโครงสร้างคอนกรีตจะมีการเสริมเหล็กเพื่อให้ความสามารถในการรับแรงดึงได้ ดังนั้นการนำวัสดุปอชโซลานมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีตจึงควรคำนึงถึงการเพิ่มความทนทานของคอนกรีตด้วยและคุณสมบัติของวัสดุปอชโซลานโดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 30

กล่าวคือ อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ มักมีความพรุนที่สูง และอาจมีความเป็นผลึกสูงและส่งผลต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยา เพื่อให้ได้ขนาดของเอ้ากันเตาที่มีขนาดที่เล็กลงใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ควบคุมคุณสมบัติของวัสดุปอชโซลานได้ดีขึ้น

## 2. วิธีการศึกษา

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย

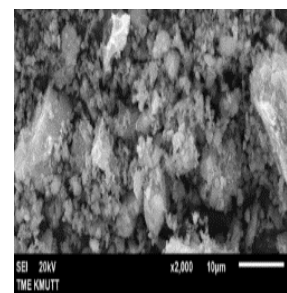
#### 2.1.1 วัสดุประสาน

ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ใช้ขวดแก้วเลอชาเตอริเออร์ (Le Chatelier) ทดสอบตามมาตรฐาน ได้ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์เท่ากับ 3.14 โดยค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ทั่วไปอยู่ระหว่าง 3.00-3.20

เอ้ากันเตา ในงานวิจัยนี้ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีสีค่อนข้างดำ เห็นได้ชัดเจนจากรูปที่ 1 สีดำของเอ้ากันเตาไม่ได้เกิดจากการคาร์บอน แต่เนื่องจากเอ้ากันเตามีปริมาณ LOI ค่อนข้างต่ำ เท่ากับร้อยละ 3.6 สีดำที่เห็นจึงน่าจะเป็นการที่วัสดุถูกเผาจนเกือบหลอมทำให้กลายเป็นสีดา อนุภาคจะมีขนาดเล็กใหญ่ปะปนกัน สามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพได้โดยการบดให้ละเอียด ส่งผลให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น รูปที่ 2 พบว่าเอ้ากันเตามีรูปทรงเป็นเหลี่ยมมุม ดังรูปที่ 2 มีองค์ประกอบของ  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$  มากกว่าร้อยละ 70 ค่า  $SO_3$  ต่ำกว่าร้อยละ 5 ค่า LOI ไม่เกินร้อยละ 6 สามารถจัดเป็นวัสดุปอชโซลาน Class F ตามมาตรฐาน [6]



รูปที่ 1 เอ้ากันเตาบดละเอียด



รูปที่ 2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง

#### ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี

Chemical Composition (%)	Cement Type I	Bottom Ash
SiO <sub>2</sub>	20.9	36.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.8	19.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.4	15.1
CaO	65.4	19.0
MgO	1.3	2.4
SO <sub>3</sub>	2.7	1.7
K <sub>2</sub> O	0.4	2.3
LOI	2.9	3.6

เมื่อพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1 ความละเอียดที่เหมาะสมต้องมีปริมาณที่คำนวณตามมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก แก้วกันตา (BA) เมื่อบดวัสดุให้มีความละเอียดสูงขึ้นส่งผลทำให้วัสดุพื้นผิวเพิ่มขึ้นทำให้สามารถทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น แก้วกันตาก่อนทำการบดมีความพรุนและช่องว่างภายในที่มีขนาดใหญ่ แต่เมื่อทำการบดให้มือนาภาคเล็กลง ความพรุนและช่องว่างดังกล่าวจึงถูกทำลาย ทำให้ความพรุนและช่องว่างมีค่าต่ำลง ส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะมีค่าสูงขึ้น [7] ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาของ [8] ที่พบว่าการบดไม่เพียงแต่ลดขนาดอนุภาคของวัสดุ แต่ยังสามารถลดความพรุนได้ด้วย ดังนั้นการนำแก้วกันตาไปใช้งานคอนกรีตต้องคำนึงถึงความละเอียดเป็นหลัก

### 2.1.2 มวลรวมและสารผสมเพิ่ม

มวลรวม ประกอบไปด้วย มวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด โดยเลือกใช้มวลรวมหยาบจากหินปูน จากการย่อย ขนาดหินโตสุดไม่เกิน 19 มิลลิเมตร และมวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำส่วนที่ผ่าน ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 (ขนาดช่องเปิด 4.75 มิลลิเมตร)

ใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ชนิด Polycarboxylate-Based superplasticizer (type F) [9] เพื่อเพิ่มความสามารถในการเทเข้าแบบ ออกแบบค่ายุบตัวของ คอนกรีตสดให้มีค่าอยู่ระหว่าง  $10 \pm 3$  ซม. ส่วนผสมคอนกรีต มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45

### 2.1.3 เหล็กเสริมคอนกรีต

งานวิจัยนี้ใช้เหล็กเส้นเสริมแรง (เหล็กเส้นกลม) เส้นผ่านศูนย์กลางที่กำหนดของเหล็กเส้นกลมคือ 12 มม. โดยมีกำลังรับแรงครากและกำลังรับแรงสูงสุดที่ 240 และ 390 MPa ตามลำดับ เหล็กเส้นกลมใช้เป็นเหล็กเสริมแรงในคานคอนกรีตเพื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าของเหล็กเส้นเมื่อใช้คานคอนกรีตควบคุมและคานคอนกรีตที่ใช้แก้วกันตาบดบางส่วนเป็นวัสดุประสาน การติดตั้งเหล็กเสริมในคานคอนกรีตเสริมเหล็กแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การติดตั้งเหล็กเสริมคอนกรีตในแบบหล่อคาน

## 2.2 การเตรียมตัวอย่างและอัตราส่วนผสม

ส่วนผสมในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย คอนกรีตควบคุม 2 ส่วนผสม คือ คอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกับคอนกรีต BA ซึ่งเท่ากับ 0.45 (CT-0.45) และคอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 (CT-0.55) โดยมีจุดประสงค์ เพื่อให้สามารถ

เปรียบเทียบคอนกรีตอีกหนึ่งชนิด คือ คอนกรีต BA ซึ่งพิจารณาให้มีกำลังอัดใกล้เคียงกันกับส่วนผสมของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 2

### ตารางที่ 2 ส่วนผสมของคอนกรีต

คอนกรีต	ส่วนผสมของคอนกรีต (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)							ค่าการยุบตัว (mm)
	ปูนซีเมนต์	แก้วกันตา	ทราย	หิน	น้ำ	W/B ratio	SP*	
BA	245	135	790	1060	170	0.45	0.38	75
CT-0.45	380	0	800	1065	170	0.45	-	105
CT-0.55	365	0	755	1000	200	0.55	-	125

SP\* คือสารลดน้ำพิเศษ Polycarboxylate-based superplasticizer (type F)

### 2.3 วิธีการทดสอบ

#### 2.3.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน [10] ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4 โดยการตัดผิวหน้าของตัวอย่างคอนกรีตให้เรียบก่อนทำการทดสอบทุกครั้ง ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน แต่ละอายุทดสอบใช้ตัวอย่างคอนกรีต 3 ตัวอย่าง โดยกำลังอัดของคอนกรีตพิจารณาจากตัวอย่างที่มีกำลังอัดแตกต่างจากค่ากำลังอัดเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบทั้งหมดไม่เกินร้อยละ 10.6

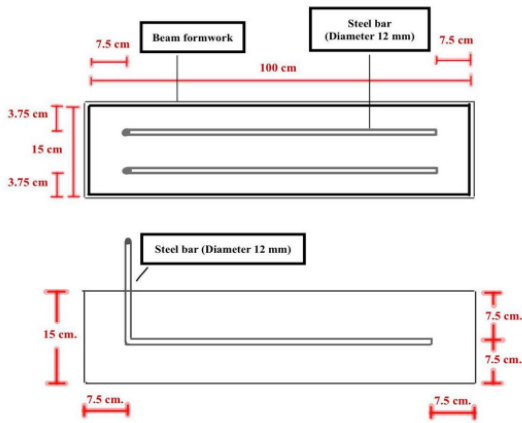


รูปที่ 4 การทดสอบกำลังอัด

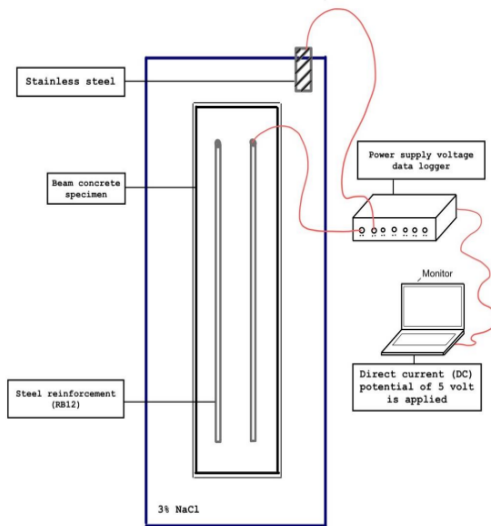
#### 2.3.2 การทดสอบการเกิดสนิมและการสูญเสียน้ำหนักของเหล็ก

1. ชั่งน้ำหนักเหล็กเสริมและบันทึกค่า จากนั้นนำมาติดตั้งแบบหล่อคานคอนกรีตขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร และลึก 15 เซนติเมตร โดยเหล็กเสริมจะอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของความลึกคาน ดังรูปที่ 5
2. เทคอนกรีตแต่ละชนิดลงในแบบหล่อคานคอนกรีต กระทุ้งและตกแต่งผิวหน้าให้เรียบร้อย แกะแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมง และบ่มน้ำจนครบอายุทดสอบ 7 วัน
3. เตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต โดยนำตัวอย่างขึ้นจากบ่อบ่ม ทั้งไว้ในอากาศ 24 ชั่วโมง และหล่ออีพ็อกซีบริเวณรอยต่อเหล็กเสริม
4. เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในการทดสอบ ตามมาตรฐาน [3] ซึ่งกำหนดความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ลงในถัง

ทดสอบ ตัวอย่างต่างๆ จากตัวอย่างเข้ากับเครื่อง Power supply voltage จากนั้นกำหนดระยะเวลาในการบันทึกข้อมูลเป็นทุกๆ 6 ชั่วโมง จบครบ 168 ชั่วโมง รูปที่ 6



รูปที่ 5 รูปแบบการวางเหล็กเสริมของคอนกรีต



รูปที่ 6 รูปแบบการติดตั้งชุดทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต

5. ภายหลังจากทดสอบโดยชุดทดสอบการเกิดสนิม ทำการหุบคอนกรีตเพื่อนำเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีต มาทดสอบการสูญเสียน้ำหนัก ตามมาตรฐาน [4] โดยนำเหล็กเสริมแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) จากนั้นชั่งน้ำหนักของเหล็กเสริมเพื่อนำหนักที่สูญเสียไป

### 2.3.3 การทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

การทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential) การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวหน้าของคอนกรีต กำหนดระยะห่างในการวัดแต่ละตำแหน่งเป็นระยะ 5 เซนติเมตร ตลอดความยาวของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต ขณะทำการวัดค่าความต่างศักย์ ตัวอย่างต้องมีความชื้นเพียงพอ ถ้าหากความชื้นไม่เพียงพอจะส่งผลให้ไม่สามารถตรวจวัดการเกิด

สนิมได้ ความสัมพันธ์ของการเกิดสนิมของตัวอย่างทดสอบเป็นไปดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความเป็นไปได้ในการเกิดสนิม [5]

ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์คอปเปอร์-คอปเปอร์ซัลเฟต (Cu/CuSO <sub>4</sub> )	สภาพการเกิดสนิม ความเป็นไปได้
มากกว่า -200 มิลลิโวลต์	90% ที่ไม่เกิดสนิม
ระหว่าง -200 มิลลิโวลต์และ-350 มิลลิโวลต์	ไม่แน่นอน
น้อยกว่า -350 มิลลิโวลต์	90% ที่เกิดสนิมแล้ว

## 3. ผลการทดสอบ

### 3.1 กำลังอัดของคอนกรีต

คอนกรีต CT-0.45 มีอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดสูงในช่วงอายุต้น 7 วัน และมีการพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่องจาก 394 กก/ซม<sup>2</sup> จนกระทั่งคอนกรีตมีอายุ 28 วันมีกำลังอัดสูงขึ้นเป็น 496 กก/ซม<sup>2</sup> แต่ภายหลังจากอายุ 28 วัน ไปแล้วกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ต่ำลง โดยมีกำลังอัดที่อายุ 90 วันเท่ากับ 506 กก/ซม<sup>2</sup> ส่วนคอนกรีต CT-0.55 มีแนวโน้มเช่นเดียวกับคอนกรีต CT-0.45 คือมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดสูงในช่วงอายุต้นและที่อายุปลายมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดที่ต่ำลงโดยที่อายุ 7, 28, และ 90 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 286, 347, และ 369 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ

การร่อนแก้วกันเตาผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 30 เป็นการคัดแยกแก้วกันเตาที่มีอนุภาคใหญ่ออก เนื่องจากอนุภาคที่ใหญ่ของแก้วกันเตาอาจส่งผลต่อการพัฒนากำลัง กล่าวคือ อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ มักมีความพรุนที่สูงและอาจมีความเป็นผลึกสูงและส่งผลต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยาซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกส่วนผสมที่มีการใช้แก้วกันเตาแทนที่ปูนซีเมนต์ที่มากที่สุด เพื่อให้บรรลุจุดประสงค์ในการนำแก้วกันเตามาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งปริมาณการแทนที่ที่ร้อยละ 35 นี้สามารถพัฒนา กำลังอัดได้ถึง 354 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 28 วัน ซึ่งปกติแล้วกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงนี้สามารถนำมาใช้งานคอนกรีตทั่วไปได้ จากตารางที่ 4 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้แก้วกันเตาปรับปรุงคุณภาพโดยการร่อนผ่านตะแกรงและบดละเอียด (BA) ที่อายุ 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 446 และ 452 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต BA เมื่อคิดเป็นร้อยละเทียบกับคอนกรีตควบคุมพบว่าสามารถให้กำลังอัดได้สูงเป็นร้อยละ 90 และ 89 ของคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 4 กำลังอัดของคอนกรีตในแต่ละช่วงอายุ

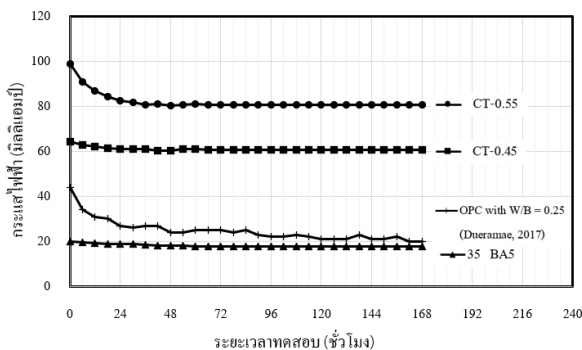
คอนกรีต	W/B	กำลังอัด(กก/ซม <sup>2</sup> )			
		7วัน	14วัน	28วัน	90วัน
BA	0.45	330	362	446	452
CT-0.45	0.45	394	465	496	506
CT-0.55	0.55	286	316	347	369

จากงานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่าการปรับปรุงเอ้ากันเตาโดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 30 และนำไปบดเพื่อเพิ่มความละเอียดเป็นการปรับปรุงคุณภาพของเอ้ากันเตาที่ก่อให้เกิดประสิทธิภาพในการรับกำลังเป็นอย่างดี โดยสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ได้ถึง 135 กก/ม<sup>3</sup> และพัฒนากำลังอัดที่อายุ 90 วันได้ถึง 452 กก/ซม<sup>2</sup> ซึ่งเหมาะสมแก่การนำไปใช้ในโครงสร้างคอนกรีตในชั้นส่วนหลัก เช่น เสา คาน พื้น ได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงเอ้ากันเตาโดยการบดเพื่อเพิ่มความละเอียดเพียงอย่างเดียวก็สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ การปรับปรุงเอ้ากันเตาก่อนการใช้งานช่วยให้อนุภาคของวัสดุประสานดังกล่าวมีขนาดเล็กลงซึ่งจะสามารถลดช่องว่างภายในคอนกรีตได้ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น ส่งผลให้คุณภาพในการรับกำลังถูกพัฒนามากยิ่งขึ้นตาม

### 3.2 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีต

#### 3.2.1 คอนกรีตควบคุม

คอนกรีต CT-0.45 และคอนกรีต CT-0.55 มีแนวโน้มการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในรูปแบบที่ต่างกันตามผลที่แสดงในรูปที่ 7 คือ ในช่วง 20 ชั่วโมงแรก ค่าการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าของคอนกรีต CT-0.55 มีการลดลงอย่างรวดเร็วและช้าลงหลังจากนั้น ในขณะที่คอนกรีต CT-0.45 ที่มีค่าการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ตั้งแต่เริ่มการทดสอบ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการทดสอบ

ค่าการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในคอนกรีต CT-0.45 มีค่าต่ำกว่าคอนกรีต CT-0.55 ทั้งนี้เป็นผลมาจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำกว่าของคอนกรีต CT-0.45 ที่นอกจากจะส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงแล้ว ปริมาณน้ำที่น้อยกว่าของคอนกรีต CT-0.45 ส่งผลให้คอนกรีต CT-0.45 ในสภาวะแข็งตัวแล้วมีช่องว่างจากการระเหยของน้ำที่น้อยลงกว่าคอนกรีต CT-0.55 ซึ่งปริมาณช่องว่างที่น้อยลงส่งผลโดยตรงต่อการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าที่ต่ำลงตามมาด้วย แม้คอนกรีต CT-0.45 จะมีกระแสไฟฟ้าโดยรวมต่ำกว่า คอนกรีต CT-0.55 แต่ผลการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบคอนกรีตที่สามารถต้านทานการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าภายใต้สภาวะต่างๆ

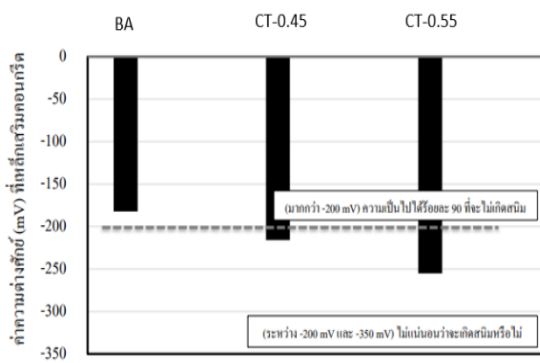
#### 3.2.2 คอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเอ้ากันเตาปรับปรุงคุณภาพโดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และบดละเอียด

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้ากับระยะเวลาในการทดสอบ ในส่วนล่างของรูปปรากฏชุดข้อมูลที่มีอัตราการไหลผ่านกระแสไฟฟ้าค่อนข้างคงที่และใกล้เคียงกัน ซึ่งพบว่า BA มีค่าอยู่ในระดับต่ำ ประมาณ 20 มิลลิแอมป์ โดยเทียบกับงานวิจัยของ [11] ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุผสม (คอนกรีต OPC) พบว่า BA มีค่าการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า จึงสามารถพิจารณาปัจจัยที่ด้านการแทรกซึมอธิบายได้ 3 ปัจจัย ประกอบด้วย 1. การใช้วัสดุประสานจากปอซโซลานที่มีความละเอียดสามารถทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น 2. ผลผลิตที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันร่วมกับปอซโซลาน ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น และ 3. ค่า w/c ของ CT-0.45 และ CT-0.55 เท่ากับ 0.45 และ 0.55 ตามลำดับ ซึ่งมีผลต่างของ w/c เท่ากับ 0.1 และค่าผลต่างของการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าประมาณ 20 มิลลิแอมป์ จะแสดงให้เห็นได้ว่า ยิ่งค่า w/c การไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นด้วย

#### 3.3 การทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

จากรูปที่ 8 แสดงค่าเฉลี่ยความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้บริเวณผิวหน้าของตัวอย่างคอนกรีตแต่ละชนิดพบว่า ค่าความต่างศักย์โดยเฉลี่ยของคอนกรีต BA , CT-0.45 และ CT-0.55 มีค่าเท่ากับ -182 , -216 และ -255 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระดับการเกิดสนิมตามมาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบวิธีแบบไม่ทำลาย [5] พบว่า คอนกรีต BA มีความเป็นไปได้ร้อยละ 90 ที่จะไม่เกิดสนิม (มากกว่า -200 มิลลิโวลต์) ส่วน CT-0.45 และ CT-0.55 มีความน่าจะเป็นในการเกิดสนิมอยู่ในระดับไม่แน่นอน (ระหว่าง -200 มิลลิโวลต์ ถึง -350 มิลลิโวลต์) ระดับการเกิดสนิมของคอนกรีต BA ที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมอีก 2 ชนิด ซึ่งเป็นผลมาจากการทดสอบการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต พบว่าข้อมูลมีความสอดคล้องกันจากเอ้ากันเตา ซึ่งเมื่อพิจารณาร่วมกับการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต และการทดสอบการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต พบว่าข้อมูลมีความสอดคล้องกัน โดยสามารถระบุได้ว่าผลจากการใช้เอ้ากันเตามีผลต่อการเกิดสนิมน้อยกว่าผลของการใช้เอ้ากันเตา

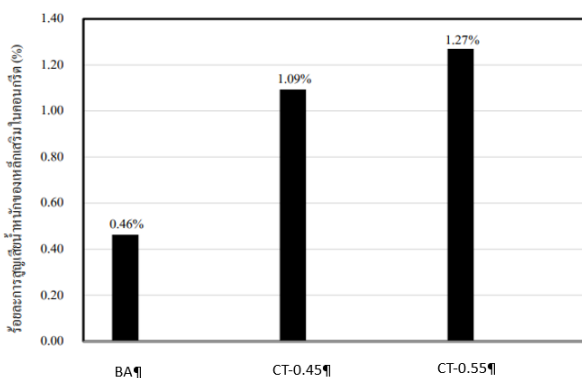
อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาคอนกรีตควบคุม CT-0.45 และ CT-0.55 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน คือเท่ากับ 0.45 และ 0.55 ตามลำดับ เห็นได้ว่าหากคอนกรีตมีวัสดุประสานชนิดเดียวกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำกว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์และลดการเกิดสนิมในคอนกรีตได้ เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงกว่าจะส่งผลให้มีปริมาณน้ำในส่วนผสมที่มากกว่า เมื่อคอนกรีตเกิดการคายน้ำและอยู่ในสภาพแข็งตัวแล้ว น้ำระเหยออกไปจะเกิดเป็นช่องว่างที่มากกว่าและส่งผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์และของเหลวต่าง ๆ ได้ง่ายกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ



รูปที่ 8 ค่าเฉลี่ยความต่างศักย์ไฟฟ้า

### 3.4 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

จากรูปที่ 9 แสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมคอนกรีต หลังจากการทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตตามมาตรฐาน [3] โดยกำจัดสนิมที่ผิวเหล็กเสริมและหาปริมาณการกัดกร่อนของสนิมตามมาตรฐาน [4] พบว่าเหล็กเสริมในคอนกรีตควบคุม CT-0.45 และ CT-0.55 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเท่ากับ ร้อยละ 1.27 และ 1.09 ตามลำดับ ส่วนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาปรับปรุงคุณภาพโดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน BA มีค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเท่ากับร้อยละ 0.46 โดยผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักสอดคล้องกับการทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีต และการทดสอบการหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ คือ BA มีผลมาจากความละเอียดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตาโดยปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าก้นเตาจะเข้าไปอุดช่องว่างของคอนกรีต ทำให้โอกาสการเกิดสนิมลดน้อยลง



รูปที่ 9 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีต

## 4. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

4.1 การใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในคอนกรีตช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้

4.2 ความละเอียดที่สูงขึ้นของเถ้าก้นเตา ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับกำลังของคอนกรีตได้ คอนกรีตที่ทำจากเถ้าก้นเตาปรับปรุงคุณภาพโดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และบดให้มีความละเอียดสูงมีกำลังการรับแรงสูงสุดที่ช่วงอายุ 90 วัน เท่ากับ 452 กก/ซม<sup>2</sup> ซึ่งใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และสามารถช่วยลดปูนซีเมนต์ได้ 135 กก/ม<sup>3</sup>

4.3 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีต BA มีค่าอยู่ในระดับต่ำประมาณ 20 มิลลิแอมป์ พบว่า BA มีค่าการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า จึงสามารถอธิบายได้ว่าการใช้วัสดุประสานจากปอซโซลานที่มีความละเอียดเพียงพอ สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์อันเป็นเหตุในการเกิดสนิมที่เหล็กเสริม

4.4 การทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ คอนกรีต BA มีความเป็นไปได้ร้อยละ 90 ที่จะไม่เกิดสนิม (มากกว่า -200 มิลลิโวลต์) ส่วน CT-0.45 และ CT-0.55 มีความน่าจะเป็นในการเกิดสนิมอยู่ในระดับไม่แน่นอน

4.5 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม โดยเหล็กที่ฝังในคอนกรีตควบคุม CT-0.45 และ CT-0.55 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเท่ากับร้อยละ 1.27 และ 1.09 ตามลำดับ ส่วนเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาปรับปรุงคุณภาพโดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน BA มีค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเท่ากับร้อยละ 0.46

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Jaturapitakkul, C., and Cheerarot, R. (2003). Development of bottom ash as pozzolanic material, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(1), pp. 48-53.
- [2] Chalee, W., Teekavanit, M., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A., and Jaturapitakkul, C. (2007). Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment, *Construction and Building Materials*, 21(5), pp. 965-971.
- [3] Nordtest method, Approved. (1989). Concrete, repairing materials and protective coating: Embedded steel method, chloride permeability, NT BUILD 356, *NordTest, Espoo, Finland*
- [4] American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM G1: Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, *ASTM International, West Conshohocken*.
- [5] มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง. (2551). มยผ. 1501-51 ถึง มยผ. 1507-51, มาตรฐานการตรวจสอบ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย, *กรมโยธาธิการและผังเมือง*, 70 หน้า.

- [6] American Society for Testing and Materials. (2019). ASTM C618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, *ASTM International*, West Conshohocken, Philadelphia, 04.02.
- [7] Sinsiri, T., Chindaprasirt, P., and Jaturapitakkul, C. (2010). "Influence of fly ash fineness and shape on the porosity and permeability of blended cement pastes", *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 17(6), pp. 683-690.
- [8] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T. (2007). Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste, *Construction and Building Materials*, 21(7), pp. 1534-1541.
- [9] American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM C494: Standard Test water reducing Hydraulic Cement by the 45- $\mu$ m (No. 325) Sieve, *ASTM International*, West Conshohocken, Philadelphia, 04.01.
- [10] American Society for Testing and Materials. (2018). ASTM C39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *ASTM International*, West Conshohocken, Philadelphia, 04.02.
- [11] Duramae, S. (2017). Strength activation and properties of concrete made with calcium carbide residue and fly ash as a cementitious material, Doctoral of Philosophy Dissertation, *Civil Engineering Program Faculty of Engineering, King Mongkut's University of technology Thonburi*, 160 p