

## การศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุปอซโซลานต่อความทนทานในการกัดกร่อนของสารละลายกรดซัลฟูริก Study on the effect of pozzolanic materials on Sulfuric acid solution attack

สุรเชษฐ์ วรรณษา<sup>1,\*</sup> เอื้อบุญ ที่พึ่ง<sup>2</sup> จิรา ธรรมนิยม<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม จ.พิษณุโลก

\*Corresponding author; E-mail address: W.surachet24@psru.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาประสิทธิภาพในการต้านทานการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟูริกของซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมวัสดุปอซโซลานดัดแปลงและวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ โดยวัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยมีการนำมาบดให้ละเอียดก่อนเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อให้มีขนาดที่ละเอียดขึ้นก่อนทำการทดลอง โดยซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่ใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาจะหล่อเป็นก้อนตัวอย่างขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 สำหรับซีเมนต์เพสต์และ 0.50 สำหรับมอร์ตาร์

จากผลการวิจัยพบว่าชนิดและประเภทของวัสดุปอซโซลานมีผลต่อการต้านทานการกัดกร่อนของสารละลายกรดซัลฟูริก โดยวัสดุปอซโซลานธรรมชาติจะมีการต้านทานสารละลายกรดซัลฟูริกได้ดีที่สุดรองลงมาคือวัสดุปอซโซลานดัดแปลงประเภทที่มีอัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกาต่ำ ส่วนวัสดุปอซโซลานดัดแปลงที่มีอัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกาสูงจะมีความสามารถต้านทานสารละลายกรดซัลฟูริกได้น้อยที่สุด ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้พบว่าอัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกาจะมีผลต่อการต้านทานต่อการกัดกร่อนสารละลายกรดซัลฟูริกอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ, วัสดุปอซโซลานดัดแปลง, การต้านทานสารละลายกรดซัลฟูริก

### Abstract

This research aimed to determine the corrosion resistance performance in sulfuric acid solutions of cement paste containing modified pozzolan and natural pozzolan materials. The natural pozzolanic material used in the research was ground for two hours to a finer size prior to experimentation. The cement paste and mortar used as a representative in the study was cast into specimens cubes measuring 50x50x50 mm and water to binder ratio was 0.30 for cement paste and 0.50 for mortar. The results found that the type and type of pozzolanic material affects the corrosion

resistance of sulfuric acid solution attack. Natural pozzolan materials showed the best performance of resistance to sulfuric acid solutions, followed by modified pozzolan materials with low CaO/SiO<sub>2</sub>, and modified pozzolan materials with high CaO/SiO<sub>2</sub> showing the least resistant to sulfuric acid solutions attack. In this study, it was found that the CaO/SiO<sub>2</sub> ratio had a significant effect on the corrosion resistance of sulfuric acid solutions.

Keywords: Natural Pozzolan, Modified Pozzolan, Resistance to sulfuric acid solutions

### 1. คำนำ

คอนกรีตที่ใช้ในงานโครงสร้างต่าง ๆ นอกจากจะคำนึงถึงกำลังอัด ประสิทธิภาพของคอนกรีตหรือการรับน้ำหนักของคอนกรีตที่ 28 วัน แล้ว ยังควรจะต้องคำนึงความทนทานของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมในด้านต่าง ๆ อีกด้วย ซึ่งในงานวิจัยหลายเรื่องที่น่าเสนอเกี่ยวกับเพิ่มประสิทธิภาพความทนทานของคอนกรีตโดยใช้วัสดุปอซโซลานเป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน [1-5] วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็น ซิลิกา หรือซิลิกาและอะลูมินา มีสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลยแต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาวที่อุณหภูมิปกติและเมื่อมีความชื้นแล้ว สามารถเกิดเป็นสารประกอบ ซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน

วัสดุจำพวกปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีที่มาจาก 2 แหล่งได้แก่ ปอซโซลานจาก ธรรมชาติ(natural pozzolan) และปอซโซลานที่ได้จาก ขบวนการผลิต (artificial pozzolan) ปอซโซลานที่ มาจากธรรมชาติได้แก่ ไดอะตอมมาเชียสเอิร์ธ (diatomaceous earth) ถ้ำภูเขาไฟ เปลือกหอย หินภูเขาไฟ วัสดุเหล่านี้เมื่อจะนำไปใช้งานจะต้องนำไปผานขบวนการต่างๆ ก่อนจึงจะนำไปใช้งานได้ เช่น การเผา การบด และการทำให้แห้ง เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำเอาปอซโซลาน จากธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเขื่อน และสะพาน เพื่อช่วยลดความร่อนที่เกิดขึ้นจาก

ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำและช่วยเพิ่มความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากซัลเฟตและกรดจากสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ช่วยควบคุมในการควบคุมปฏิกิริยาระหว่างด่างกับซิลิกา นอกจากนี้ยังมีผลพลอยได้ในกรลด ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอีกทางหนึ่งด้วย ปอซโซลานที่ได้จากขบวนการผลิต ไดแก่ แกลลยที่เป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่าน หรือหินที่ถูกบดในการผลิตกระแสไฟฟ้า แกลลยประกอบดวยอนุภาคทรงกลมของซิลิกาเป็นส่วน ประกอบที่สำคัญประมาณ 66 – 68 % แกลลยบางชนิดสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับปูน ขาวและด่างเกิดเป็นสารประกอบที่มีแรงยึดประสาน แต่แกลลยบางชนิดก็สามารถทำปฏิกิริยากับ น้ำและแข็งตัวได้เช่นเดียวกัน [6] ประเทศไทยมีวัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่ใช้งานคอนกรีตมากมาย ได้แก่ แก่ชานอ้อย และแก่กลบ ส่วนวัสดุปอซโซลานดัดแปลงที่เป็นแกลลยได้มาจากการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า 2 แหล่งที่สำคัญที่ใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตแหล่งแรกคือแกลลยที่มีปริมาณ CaO สูง (แกลลยแม่เมาะ) ในขณะที่อีกแหล่งเป็นแกลลยที่มีปริมาณ CaO ต่ำ (แกลลย BLCP) ซึ่งวัสดุปอซโซลานเหล่านี้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความทนทานต่อสภาวะที่เป็นซัลเฟตหรือเป็นกรดที่อยู่ในน้ำเสียได้เป็นอย่างดีซึ่งมีงานวิจัยมากมายได้รับรองประสิทธิภาพของวัสดุปอซโซลานในการแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มความทนทานของคอนกรีตในสภาวะที่เป็นกรด [7-9]

ปัจจุบันประเทศไทยมีความตื่นตัวในเรื่องงานก่อสร้างระบบระบายน้ำเสียใต้ดิน (Underground) ซึ่งในอนาคตอันใกล้จะมีการก่อสร้างระบบน้ำเสียใต้ดิน (Underground) เป็นอันมาก

ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาน้ำวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการพัฒนาให้คอนกรีตมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำเสีย เพื่อเป็นประโยชน์การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีความทนทานต่อสภาวะที่เป็นกรดได้เป็นอย่างดีในอนาคต

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 วัสดุ

(1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานมาตรฐาน มอก. 15 หรือ ASTM C150 มีความถ่วงจำเพาะ 3.15

(2) แก่กลบ เป็นแก่กลบสีเทาขาว เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่เหลือใช้การเผาในอุตสาหกรรมอิฐมอญ ในจังหวัดพิจิตร มีค่าถ่วงจำเพาะ 2.13 ก่อนการทดลองได้ทำการบดแก่กลบให้มีขนาดเล็กกลงโดยทำการบด 2 ขนาด คือบดเป็นเวลา 3 ชั่วโมงและ 6 ชั่วโมงโดยโดยใช้เครื่องบดที่มีมอเตอร์ความเร็วรอบที่ 1,450 รอบ/นาที

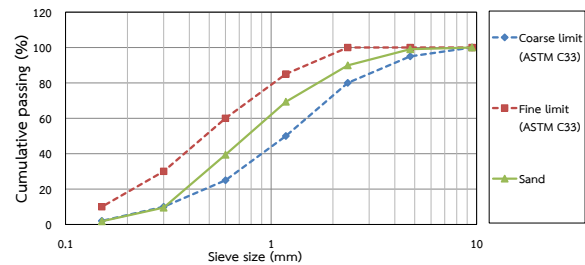
(3) แก่ลยที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ต่ำ (ไม่เกินร้อยละ 10) ตามมาตรฐาน มอก.2135-2545 (ก) ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานดัดแปลงที่ได้จากโรงไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง

(4) แก่ลยที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์สูง (เกินร้อยละ 10) ตามมาตรฐาน มอก.2135-2545 (ข) ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานดัดแปลงที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

(5) ทราย เป็นทรายหยาบแม่น้ำที่มีอยู่ในจังหวัดพิษณุโลก มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.54 จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 128 และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 1.93 และมีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 ดังแสดงในรูปที่ 1

(6) น้ำ ที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำประปาที่มีความสะอาด

(7) สารละลายกรดใช้กรดซัลฟิวริก (95-97%)



รูปที่ 1 การกระจายขนาดคละของทรายที่ใช้ในการทดลอง

## 3. ระเบียบวิธีวิจัย

### 3.1 การเตรียมตัวอย่าง

(1) ทำการหล่อก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C 109 โดยใช้อัตราส่วนผสมวัสดุประสาน: ทราย เท่ากับ 1: 2 โดยน้ำหนักและอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.30 สำหรับซีเมนต์เพสต์ และ w/b เท่ากับ 0.50 สำหรับมอร์ตาร์

(2) แทนที่วัสดุปอซโซลานธรรมชาติและดัดแปลงในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15 และร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

(3) หลังจากหล่อก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์แล้ว 1 วัน ทำการถอดแบบและนำไปบ่มในน้ำสะอาดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน

### 3.2 การเตรียมตัวอย่างสารละลายกรดซัลฟิวริก

(1) สารละลายกรดถูกเตรียมโดยใช้กรดซัลฟิวริก (95-97%) ละลายในน้ำรีเวิร์สออสโมซิสเพื่อให้ได้สารละลายที่มีค่า pH เท่ากับ 1 นำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ได้เตรียมที่มีสัดส่วนการผสมต่าง ๆ กันไปแช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกและมีการควบคุมค่า pH ของสารละลายกรดวัดทุกวันด้วยเครื่องวัดค่า pH Mettler, ความแม่นยำ + 1) ให้ค่า pH เท่ากับ 1 ตลอดเวลาของการทดสอบ

### 3.3 วิธีการทดสอบ

#### 3.3.1 การวัดค่าการกัดกร่อนของสารละลายกรดซัลฟิวริก

(Acid corrosion test)

หลังจากบ่มตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ในน้ำเป็นเวลา 28 วัน ให้วัดน้ำหนักเริ่มต้นของแต่ละก้อนตัวอย่างจากนั้นวางก้อนตัวอย่างลงในสารละลาย

กรดซัลฟูริกค่า pH 1 ที่เตรียมไว้จากนั้นนำก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ขึ้นมาวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปทุกสัปดาห์โดยก่อนการวัดน้ำหนักจะทำการแปรงด้วยแปรงขนนุ่มเพื่อขจัดพื้นผิวที่ไม่แข็งแรงและแตกตัวซึ่งเกิดจากการถูกกรดทำลายออกไปก่อนและใช้ผ้าขนหนูสะอาดเช็ดให้แห้ง การวัดสูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์แต่ละส่วนผสมจะถูกคำนวณการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์จำนวน 3 ก้อน การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเป็นเปอร์เซ็นต์คำนวณโดยใช้สมการที่ (1)

$$\text{ค่าการสูญเสียน้ำหนัก} = [(w_f - w_i) / w_i] \times 100 \% \quad (1)$$

เมื่อ  $w_i$  = ค่าน้ำหนักเริ่มต้นก่อนการแช่สารละลายกรดซัลฟูริก (กรัม)

$w_f$  = ค่าน้ำหนักเริ่มต้นหลังการแช่สารละลายกรดซัลฟูริก (กรัม)

### 3.3.2 การรับกำลังอัด (Compressive strength)

การรับกำลังอัดของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์แต่ละส่วนผสมถูกทดสอบที่อายุ 28 วันและ 90 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการรับน้ำหนักของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ จำนวน 3 ก้อน

### 3.4 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองครั้งนี้จะใช้ส่วนผสมทั้งหมด 18 ส่วนผสมสามารถแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมซีเมนต์เพสต์

ลำดับ	ส่วนผสม	อัตราส่วน น้ำต่อ วัสดุ ประสาน (w/b)	ทราย	ปูนซีเมนต์ ปอร์ต แลนด์ ประเภทที่ 1 (C)	เถ้า ลอย แม่ (FAM)	เถ้า ลอย BLCP (FAR)	เถ้า กลบ บด 3 ชม. (RHA- 3)	เถ้า กลบ บด 6 ชม. (RHA- 6)
1	C100	0.30	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	C85FAM15	0.30	0.00	0.85	0.15	0.00	0.00	0.00
3	C70FAM30	0.30	0.00	0.70	0.30	0.00	0.00	0.00
4	C85FAR15	0.30	0.00	0.85	0.00	0.15	0.00	0.00
5	C70FAR30	0.30	0.00	0.70	0.00	0.30	0.00	0.00
6	C85RHA-3-15	0.30	0.00	0.85	0.00	0.00	0.15	0.00
7	C70RHA-3-30	0.30	0.00	0.70	0.00	0.00	0.30	0.00
8	C85RHA-6-15	0.30	0.00	0.85	0.00	0.00	0.00	0.15
9	C70RHA-6-30	0.30	0.00	0.70	0.00	0.00	0.00	0.30
10	M100	0.50	2.75	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	M85FAM15	0.50	2.75	0.85	0.15	0.00	0.00	0.00
12	M70FAM30	0.50	2.75	0.70	0.30	0.00	0.00	0.00
13	M85FAR15	0.50	2.75	0.85	0.00	0.15	0.00	0.00
14	M70FAR30	0.50	2.75	0.70	0.00	0.30	0.00	0.00
15	M85RHA-3-15	0.50	2.75	0.85	0.00	0.00	0.15	0.00
16	M70RHA-3-30	0.50	2.75	0.70	0.00	0.00	0.30	0.00

17	M85RHA-6-15	0.50	2.75	0.85	0.00	0.00	0.00	0.15
18	M70RHA-6-30	0.50	2.75	0.70	0.00	0.00	0.00	0.30

## 4. การทดลองและการอภิปรายผล

### 4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, เถ้าลอย, และเถ้ากลบบด แสดงในตารางที่ 2 โดยวิธี X-ray Fluorescence (XRF) พบว่าเถ้าลอยจาก 2 แหล่ง (โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปางและโรงไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง) มีองค์ประกอบหลัก คือ SiO<sub>2</sub> ปริมาณร้อยละ 40.93 และ 61.91 ตามลำดับ, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีปริมาณร้อยละ 22.42 และ 20.35 ตามลำดับ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีปริมาณร้อยละ 13.64 และ 5.20 ตามลำดับ ส่วนองค์ประกอบ CaO ของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปางมีปริมาณร้อยละ 13.63 และจากโรงไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง มีปริมาณร้อยละ 2.32 ซึ่งเถ้าลอยจากทั้ง 2 แหล่งจัดเป็นเถ้าลอยประเภท Class F เนื่องจากปริมาณองค์ประกอบของ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มากกว่าร้อยละ 70 ด้วยกันทั้งคู่ แต่หากแบ่งประเภทตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.2135-2545 จะถูกจัดเป็นเถ้าลอยประเภท (ก) สำหรับเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า BLCP (ปริมาณร้อยละของ CaO ต่ำกว่าร้อยละ 10) และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจะถูกจัดเป็นเถ้าลอยประเภท (ข) (ปริมาณร้อยละของ CaO เกินกว่าร้อยละ 10) ส่วนเถ้ากลบบดมีองค์ประกอบ SiO<sub>2</sub> ร้อยละ 91.6, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีปริมาณร้อยละ 0.40, 0.60 ตามลำดับ ปริมาณ CaO มีปริมาณร้อยละ 0.80 ซึ่งเถ้ากลบบดถูกจัดเป็นวัสดุพิษโซลัน Class N เนื่องจากมีองค์ประกอบหลักทางเคมีเข้าเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM C618 กล่าวคือ องค์ประกอบของ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มากกว่าร้อยละ 70 และมีค่า SO<sub>3</sub> มีค่าเท่ากับ 2.2 ซึ่งไม่เกินร้อยละ 4 ค่า LOI มีค่าร้อยละ 3.4 ซึ่งไม่เกินร้อยละ 10

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

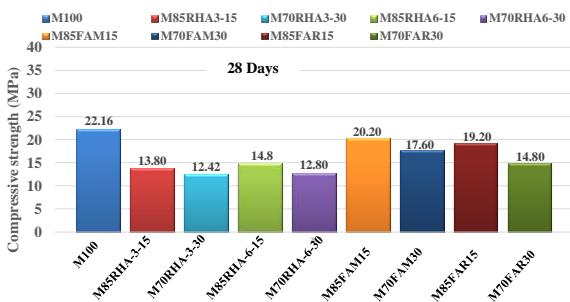
องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C)	เถ้าลอยโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (FAM)	เถ้าลอยโรงไฟฟ้า BLCP (FAR)	เถ้ากลบบด (RHA)
SiO <sub>2</sub>	19.7	40.93	61.91	91.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.19	22.42	20.35	0.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.34	13.64	5.20	0.6
CaO	64.8	13.63	2.32	0.8
MgO	1.2	2.93	1.35	0.2
Na <sub>2</sub> O	0.16	0.89	0.79	-
K <sub>2</sub> O	0.44	2.39	1.36	3.0
SO <sub>3</sub>	2.54	1.93	0.28	2.2
Free lime	0.87	0.22	0.19	-

LOI	2.1	0.46	5.68	2.2
Specific gravity	3.15	40.93	61.91	2.13

#### 4.2 ค่ากำลังอัดประลัย (Compressive Strength)

ค่ากำลังอัดประลัยของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ถูกทดสอบหลังบ่มในน้ำ สะอาดเป็นเวลา 28 วันและ 90 วัน แสดงในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

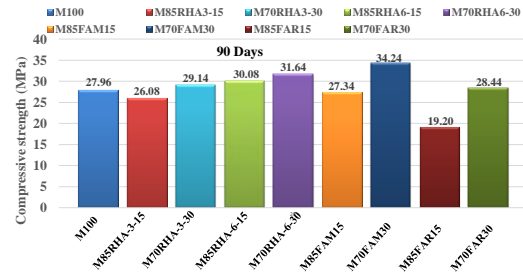
จากรูปที่ 2 แสดงค่ากำลังอัดของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน โดย M100 ให้ค่ากำลังอัดประลัยสูงสุด คือ 22.16 MPa กลุ่มที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะให้ค่ากำลังอัดประลัยที่ 28 วัน รองลงมาคือ 20.20 MPa และ 17.60 MPa สำหรับการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 15 และ 30 ตามลำดับ กลุ่มที่มีการแทนที่ด้วยเถ้า ลอยจากโรงไฟฟ้า BLCP ให้ค่ากำลังอัดประลัยที่ 28 วัน เป็นอันดับที่ 3 คือให้ค่ากำลังอัดประลัยที่ 19.20 MPa และ 14.80 MPa สำหรับการ แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 และ 30 ตามลำดับ ส่วนก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบจะให้ค่ากำลังอัดประลัยที่ 28 วัน น้อยกว่าก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอย แต่จาก ผลการวิจัยพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ 6 ชั่วโมงให้ค่า กำลังอัดประลัยที่ 28 วัน ได้มากกว่าเถ้าแกลบ 3 ชั่วโมง ซึ่งจากรูปที่ 2 พบว่าก้อนตัวอย่างมอร์ต้า M85RHA-6-15 ให้ค่ากำลังอัดประลัย 14.80 MPa และ M70RHA-6-30 ให้ค่ากำลังอัดประลัย 12.80 MPa ส่วนกลุ่ม ของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ 3 ชั่วโมงให้ค่ากำลังอัดประลัยต่ำที่สุด คือ M85RHA-3-15 ให้ค่ากำลังอัด ประลัย 13.80 MPa และ 12.42 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 2 กำลังอัดประลัยของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน

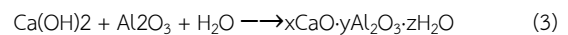
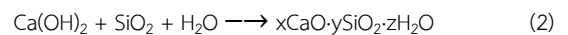
จากรูปที่ 3 แสดงค่ากำลังอัดประลัยของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อายุ 90 วัน โดยก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ M70FAM30 ให้ค่ากำลังอัดประลัยสูง ที่สุดคือ 34.24 MPa รองลงมาคือกลุ่มก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีการ แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 6 ชั่วโมงและ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ โดย M70RHA-6-30 ให้ค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 31.64 MPa และ M85RHA- 6-15 ให้ค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 30.08 MPa M70RHA-3-30 ให้ค่า กำลังอัดประลัยเท่ากับ 29.14 MPa ส่วน M85RHA-3-30 ให้ค่ากำลังอัด ประลัยเท่ากับ 26.08 MPa ซึ่งน้อยกว่าก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม M100 เล็กน้อย (M100 เท่ากับ 27.96 MPa ส่วนก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่

มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า BLCP จะให้ค่ากำลังอัด ประลัยน้อยโดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์โดย การแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30; M70FAR30 ให้ค่ากำลังอัดประลัย เท่ากับ 28.44 MPa และ การแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15; M85FAR15 ให้ค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 19.20 MPa



รูปที่ 3 กำลังอัดประลัยของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อายุ 90 วัน

จากผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าค่าของกำลังอัดประลัยของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ 28 วัน มีความสัมพันธ์กับปริมาณของ CaO ในส่วนผสมของก้อน ตัวอย่างมอร์ตาร์เนื่องจากปริมาณ CaO ในก้อนตัวอย่างจะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกลายเป็น Ca(OH)<sub>2</sub> จะมีผลต่อการพัฒนาค่ากำลังอัดในระยะต้น (ที่ 28 วัน) อย่างมีนัยสำคัญ [10] ซึ่งยังมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย วัสดุปอซโซลานปริมาณมากจะเป็นการยิ่งลดปริมาณ Ca(OH)<sub>2</sub> โดยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “Dilution Effect” อย่างไรก็ตามการแทนที่ด้วยวัสดุ ปอซโซลานจะสามารถพัฒนาค่ากำลังอัดประลัยในระยะปลาย (ที่ 90 วันขึ้นไป) ได้ด้วยปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ซึ่งเป็น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับ น้ำโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)<sub>2</sub> ที่เกิดจากปูนซีเมนต์กับน้ำเป็น สารตั้งต้นร่วมกับ SiO<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> จากวัสดุปอซโซลาน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-SH) และ แคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ดังแสดงในสมการที่ (2) และ (3)



เหตุผลอีกประการที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ 6 ชั่วโมงมีค่า กำลังอัดประลัยที่มากกว่าเถ้าแกลบ 3 ชั่วโมงเนื่องจากอนุภาคที่ ละเอียดขึ้นสามารถทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันกระจายตัวและทำปฏิกิริยาได้ สมบูรณ์ขึ้น [11]

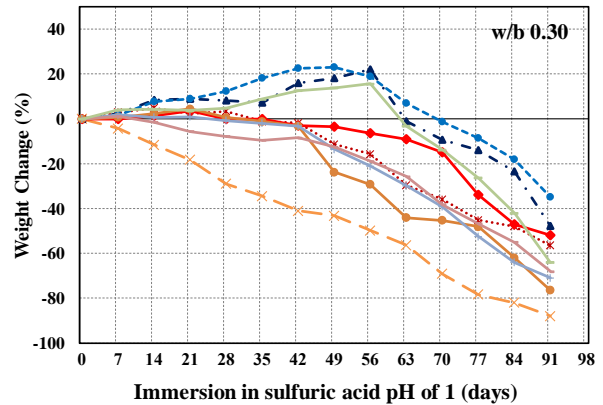
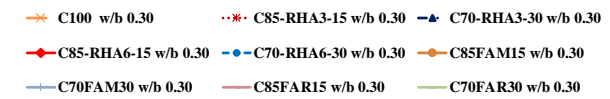
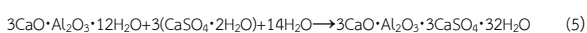
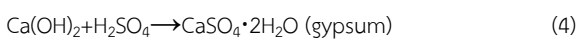
#### 4.3 การสูญเสียน้ำหนักหลังการแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก (Weight loss)

รูปที่ 4 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์จาก การแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกค่า pH 1 เป็นระยะเวลา 91 วัน จากผล การทดสอบพบว่าก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ควบคุม (C100) มีค่าการ

สูญเสียน้ำหนักมากที่สุด คือ สูญเสียน้ำหนักร้อยละ 88 ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานจะสามารถช่วยลดการสูญเสียน้ำหนักในการแช่สารละลายกรดซัลฟูริกได้อย่างชัดเจนโดยส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบจะสามารถต้านทานการกัดกร่อนของสารละลายกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย โดยค่าการสูญเสียของก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ร้อยละ 30 ด้วยเถ้าแกลบ 6 ชั่วโมง (C70RHA-6-30) มีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 34.90 รองลงมาคือการแทนที่ร้อยละ 30 ด้วยเถ้าแกลบ 3 ชั่วโมง (C70RHA-3-30) มีการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 47.69 ส่วนการแทนที่ร้อยละ 15 เถ้าแกลบ 6 ชั่วโมงยังให้ผลการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยกว่า เถ้าแกลบ 3 ชั่วโมง คือ C85RHA-6-15 มีการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 52 ส่วน C85RHA-3-15 มีการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 56.44 ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้ง 2 แหล่ง เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า BLCP ให้ผลการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะทั้งการแทนที่ร้อยละ 15 และ 30 คือการแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 C70FAR30 มีการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 64, C70FAM30 มีการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 71 ส่วนการแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 15, C85FAR15 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 68 และ C85FAM15 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 76.40

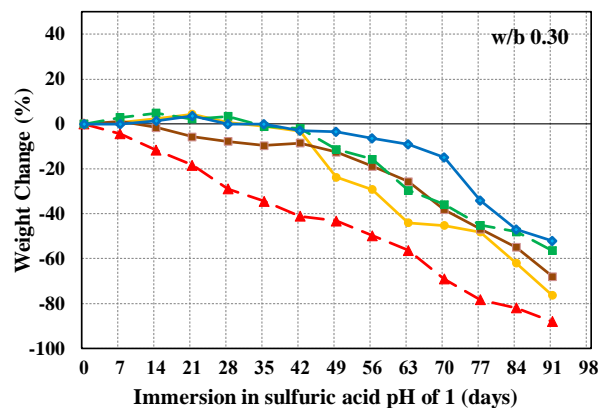
ทั้งนี้การที่วัสดุปอซโซลานช่วยการต้านทานการกัดกร่อนของสารละลายกรดซัลฟูริกได้ดีนั้นเนื่องจากเป็นเพราะความสามารถในการลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) ในก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ที่เสี่ยงต่อการถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก [12]

การเสื่อมสภาพของก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ในสารละลายกรดซัลฟูริกเริ่มต้นจากซัลเฟตไอออน จากสารละลายกรดทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออนกลายเป็นยิปซัมและettringite ที่มีปริมาณมากกว่าเดิมถึง 2.2 เท่าและ 7 เท่า ตามลำดับ เป็นผลให้ก้อนตัวอย่างมีการบวมและขยายตัวทำให้มีรอยร้าวขนาดเล็กตามพื้นผิวของก้อนตัวอย่างจากนั้นเมื่อปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์เริ่มหมดสารละลายกรดซัลฟูริกจะเริ่มทำลายโครงสร้าง C-S-H ของก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์แทนทำให้โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์เริ่มเสียหายอย่างหนักทำให้เกิดการสลายตัวในที่สุดนำไปสู่การสูญเสียน้ำหนักที่มีปริมาณมากตามมา การกัดกร่อนของสารละลายซัลฟูริกต่อก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์สามารถแสดงในสมการที่ (4) ถึง สมการ (6) [13]

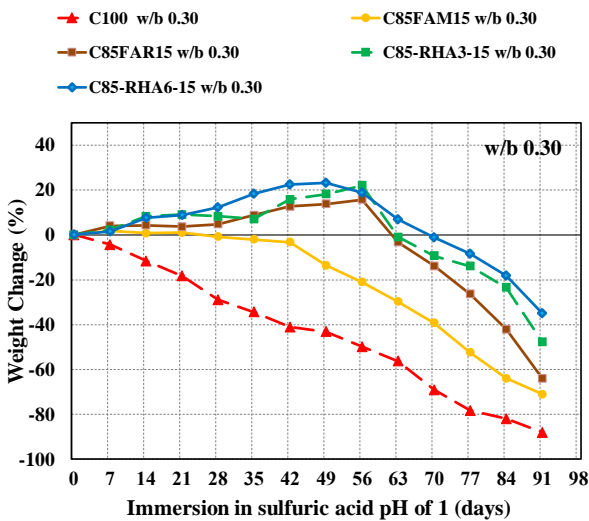


รูปที่ 4 การสูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ในการแช่สารละลายกรดซัลฟูริก pH 1 ที่ระยะ 90 วัน

รูปที่ 5 และ 6 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการต้านทานการกัดกร่อนของสารละลายกรดซัลฟูริกด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบและเถ้าลอย ร้อยละ 15 และร้อยละ 30 ตามลำดับ



รูปที่ 5 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15



รูปที่ 6 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30

จากกราฟแสดงให้เห็นได้ว่าก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ด้วยถ้าแกลบบดทั้ง 3 ชั่วโมงและ 6 ชั่วโมง มีความต้านทานต่อสารละลายกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยแกลบลอย อย่างไรก็ตามในส่วนของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแกลบลอยด้วยกัน พบว่าแกลบลอยจากโรงไฟฟ้า BLCP ให้ผลการต้านทานต่อสารละลายกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าแกลบลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เหตุผลที่แกลบบดสามารถต้านทานสารละลายกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าแกลบลอยนั้นเพราะองค์ประกอบทางเคมีที่มีส่วนประกอบของ SiO<sub>2</sub> ที่มีปริมาณสูงและมีองค์ประกอบของ CaO น้อยมากหรือเทียบจะไม่มีเลยส่งผลให้เมื่อก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีแกลบบดเป็นส่วนผสมจะสามารถต้านทานสารละลายกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าเพราะ CaO เป็นองค์ประกอบให้เกิดสาร CaOH<sub>2</sub> ในก้อนซีเมนต์เพสต์ดังนั้นหากมีปริมาณของ CaO น้อยก็จะทำให้ปริมาณ CaOH<sub>2</sub> น้อยไปด้วย [14] อีกทั้งปริมาณ SiO<sub>2</sub> ปริมาณสูงของแกลบส่งผลต่อปริมาณของ C-S-H ของโครงสร้างในซีเมนต์เพสต์ของก้อนตัวอย่างตามสมการที่ (2) และ (3) เหตุผลนี้สามารถอธิบายความต้านทานที่แตกต่างกันของการแทนที่แกลบลอยจาก 2 แหล่งได้เช่นกันเพราะแกลบลอยจากโรงไฟฟ้า BLCP มีองค์ประกอบของ SiO<sub>2</sub> ที่สูงกว่าและปริมาณ CaO น้อยกว่าแกลบลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

อีกเหตุผลหนึ่งที่สำคัญของการต้านทานสารละลายกรดซัลฟูริก คือ อัตราส่วน CaO/SiO<sub>2</sub> มีงานวิจัยพบว่าอัตราส่วน CaO/SiO<sub>2</sub> มีผลต่อการกัดกร่อนของสารละลายกรดซัลฟูริกเพราะโครงสร้างของ C-S-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะมีอัตราส่วน CaO/SiO<sub>2</sub> ที่ต่ำส่งผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวพันธะระหว่างตัวเองมีค่าสูงทำให้สามารถต้านทานการทำลายจากสารละลายกรดต่าง ๆ ได้ดี [15,16] เราสามารถคำนวณปริมาณ CaO/SiO<sub>2</sub> ของก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์จากองค์ประกอบทางเคมีได้จากสมการที่ (7)

$$\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = \frac{(\text{CaO}_c \times W_c) + (\text{CaO}_{\text{วัสดุประสาน}} \times W_{\text{วัสดุประสาน}})}{(\text{SiO}_{2c} \times W_c) + (\text{SiO}_{2\text{วัสดุประสาน}} \times W_{\text{วัสดุประสาน}})} \quad (7)$$

เมื่อ CaO<sub>c</sub> = ปริมาณร้อยละของ CaO ของปูนซีเมนต์ในซีเมนต์เพสต์

CaO<sub>วัสดุประสาน</sub> = ปริมาณร้อยละของ CaO ของวัสดุประสานในซีเมนต์เพสต์

SiO<sub>2c</sub> = ปริมาณร้อยละของ SiO<sub>2</sub> ของปูนซีเมนต์ในซีเมนต์เพสต์

SiO<sub>2วัสดุประสาน</sub> = ปริมาณร้อยละของ SiO<sub>2</sub> ของวัสดุประสานในซีเมนต์เพสต์

W<sub>c</sub> = ปริมาณร้อยละการใช้น้ำปูนซีเมนต์ในซีเมนต์ในซีเมนต์เพสต์

W<sub>วัสดุประสาน</sub> = ปริมาณร้อยละการใช้น้ำวัสดุประสานในซีเมนต์ในซีเมนต์เพสต์

อัตราส่วน CaO/SiO<sub>2</sub> ของก้อนตัวอย่างสามารถคำนวณจากสมการที่ (7) แล้วพบว่า C100 มีอัตราส่วน CaO/SiO<sub>2</sub> สูงที่สุดคือเท่ากับ 3.29 ส่วนกลุ่มที่แทนที่ด้วยแกลบลอยจะมีค่าสูงกว่ากลุ่มของการแทนที่ด้วยแกลบบด คือ C85FAM15 มีค่าเท่ากับ 2.50, C85FAR15 มีค่าเท่ากับ 2.13, C70FAM30 มีค่าเท่ากับ 1.90, C70FAR30 มีค่าเท่ากับ 1.42 ส่วนกลุ่มแกลบลอยมีอัตราส่วน CaO/SiO<sub>2</sub> น้อยที่สุดคือ C85RHA15 มีค่าเท่ากับ 1.81, C70RHA30 มีค่าเท่ากับ 1.66 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 อัตราส่วน CaO/SiO<sub>2</sub>

ลำดับ	ส่วนผสม	อัตราส่วน CaO/SiO <sub>2</sub>
1	C100	3.29
2	C85FAM15	2.50
3	C70FAM30	1.90
4	C85FAR15	2.13
5	C70FAR30	1.42
6	C85RHA-3-15	1.81
7	C70RHA-3-30	1.66
8	C85RHA-6-15	1.81
9	C70RHA-6-30	1.66

## 5. บทสรุป

1. สารละลายกรดซัลฟูริกจะทำลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ CaOH<sub>2</sub> เป็นอันดับแรกในก้อนตัวอย่างเป็นผลให้ก้อนตัวอย่างเริ่มเสื่อมสภาพและขยายตัวหลังจากนั้นจะเริ่มทำลายโครงสร้าง C-S-H ต่อไปจนนำไปสู่การสูญเสียน้ำหนักที่มีขนาด

- มากขึ้นดังนั้นหากเพิ่มการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานจะช่วยลดการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายกรดซัลฟูริกได้
2. วัสดุปอซโซลานจะช่วยสร้างโครงสร้าง C-S-H ที่แข็งแรงกว่าเดิมทำให้สามารถต้านทานการกัดกร่อนของสารละลายกรดซัลฟูริกได้ดี
  3. วัสดุปอซโซลานธรรมชาติจะต้านทานการกัดกร่อนของสารละลายกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าวัสดุปอซโซลานดัดแปลง
  4. ในกลุ่มของวัสดุปอซโซลานดัดแปลง (เถ้าลอย) เถ้าลอยที่มีองค์ประกอบ CaO ต่ำจะช่วยต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าเถ้าลอยที่มีองค์ประกอบ CaO สูง แต่จะทำให้มีค่ากำลังอัดประลัยต่ำเนื่องจากปริมาณ  $\text{CaOH}_2$  ที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณน้อยลง

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Elyamany, H. E., Elmoaty, A. E. M. A., & Mohamed, B. (2014). Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self-compacting concrete and Flowable concrete. *Alexandria Engineering Journal*, 53(2), 295-307. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2014.03.010>
- [2] Kaewmanee, K., & Tangtermsirikul, S. (2014). Properties of binder systems containing cement, fly ash and limestone powder. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 36(5), 569-576.
- [3] Khunthongkeaw, J., Tangtermsirikul, S., & Leelawat, T. (2004) A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. *Construction and building materials*, 20 (9), 744-753.
- [4] Lei W., Fanxing G., Huamei Y., Yan W., & Shengwen T. (2020). Comparison of fly ash, PVA fiber, MgO and shrinkage-reducing admixture on the frost resistance of face slab concrete via pore structural and fractal analysis. *Fractals*, 29(02), [https://doi: 10.1142/S0218348X21400028](https://doi.org/10.1142/S0218348X21400028)
- [5] วันทยาวิฑูรย์ วงศ์ทองแก้ว, จักรพันธ์ วงศ์พา, และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2546). การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 1*, จ.กาญจนบุรี, กันยายน-ตุลาคม 2546, หน้า 39-42.
- [6] อานนท์ ป้อมประสิทธิ์ (2565). ปอซโซลาน (Pozzolan). กองฟิลิกส์และวิศวกรรม.[http://www.dss.go.th/images/st-article/pep\\_11\\_2545\\_pozzolan.pdf](http://www.dss.go.th/images/st-article/pep_11_2545_pozzolan.pdf)
- [7] Aydin, S., Yazici, H., Yiğiter, H., & Baradan, B. (2007). Sulfuric acid resistance of high-volume fly ash concrete. *Building and Environment*, 42(2), 717-721.
- [8] Bassuoni, M. T., & Nehdi, M. L. (2007). Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction. *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1070-1084.
- [9] Makhloufi, Z., Bederina, M., Bouhicha, M., & Kadri, E. H. (2014). Effect of mineral admixtures on resistance to sulfuric acid solution of mortars with quaternary binders. *Physics Procedia*, 55, 329-335. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.07.048>
- [10] ชัชวาล เศรษฐบุตร (2537), คอนกรีต เทคโนโลยี Concrete technology กรุงเทพฯ. บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด.
- [11] สุรเชษฐ์ วรรณนา, เอื้อบุญ ที่พึ่ง (2562) การศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตบล็อกด้วยเถ้ากลบสด. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24*, จ.อุดรธานี, 10-12 กรกฎาคม 2562.
- [12] Wanna, S., Saengsoy, W., Toochinda, P., & Tangtermsirikul, S. (2020). Effects of Sand Powder on Sulfuric Acid Resistance, Compressive Strength, Cost Benefits, and CO2 Reduction of High CaO Fly Ash Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020.
- [13] Wanna, S., Toochinda, P., Saengsoy, W., & Tangtermsirikul, S. (2021). Deterioration in Sulfuric Acid of Cement Pastes incorporating High CaO and Low CaO Fly Ashes. *Engineering Journal*, 25(2), 71-83.
- [14] Khunthongkeaw, J.; Tangtermsirikul, S.; Leelawat, T.: A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. *Construction and building materials*. 20 [9], 744-753 (2004).
- [15] Bassuoni, M. T., & Nehdi, M. L. (2007). Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction. *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1070-1084.<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.014>
- [16] Wanna, S., Saengsoy, W., Toochinda, P., & Tangtermsirikul, S. (2021). Sulfuric Acid Resistance of Cement Pastes Containing Fly Ash and Limestone Powder. In *EASEC16* (pp. 2001-2011). Springer, Singapore.