

## การพัฒนาคอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุกากอุตสาหกรรมสำหรับป้องกันการกัดกร่อนโดยกรดและการขัดสีเพื่อ ประยุกต์ใช้กับพื้นฟาร์มสุกร

### Development of concrete containing industrial waste for acid corrosion – abrasion

#### resistance for concrete floors in pig farm applications

เจนศักดิ์ คชนิล<sup>1</sup> ทนศักดิ์ โนไชยา<sup>2</sup> ธวัช สุริวงษ์<sup>3</sup> ศุภกร เมาลีกุล<sup>4</sup> และ พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง<sup>5,\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมบริหารงานก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ จ.อุดรดิตถ์

<sup>2</sup>ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จ.พิษณุโลก

<sup>3</sup>วิทยาลัยพลังงานทดแทนและสมาร์ทกริดเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จ.พิษณุโลก

<sup>4</sup>บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) จ.กรุงเทพฯ

<sup>5</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จ.พิษณุโลก

\*Corresponding author; E-mail address: phongthornj@nu.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถของคอนกรีตต่อการต้านทานการกัดกร่อนโดยกรดรวมทั้งการขัดสีซึ่งเป็นลักษณะการกัดกร่อนที่พื้นคอนกรีตบริเวณเครื่องให้อาหารของฟาร์มสุกร วัสดุประสานที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้แก่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมหรือเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมโดยใช้วัสดุประสานดังกล่าวถูกนำมาทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัด การกัดกร่อนโดยกรด การกัดกร่อนจากการขัดสี และการกัดกร่อนโดยกรดรวมทั้งการขัดสี การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทดสอบที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28, 56 และ 84 วัน การใช้ซิลิกาฟูมทดแทนซีเมนต์ส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่เถ้าถ่านหินส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน คอนกรีตเกิดอัตราการกัดกร่อนโดยกรดลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นวัสดุประสาน ในขณะที่การใช้ซิลิกาฟูมหรือเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนโดยกรดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับผลการทดสอบการกัดกร่อนจากการขัดสี งานวิจัยนี้ได้ออกแบบเครื่องมือทดสอบพิเศษสำหรับการกัดกร่อนโดยกรดโดยตัวอย่างอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้งและเครื่องขัดซึ่งมีลักษณะการกัดกร่อนแบบเดียวกันกับลักษณะการกัดกร่อนที่เกิดกับพื้นฟาร์มสุกร ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้ซิลิกาฟูมหรือเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ช่วยเพิ่มความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนโดยกรดและการขัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: คอนกรีต, การกัดกร่อนโดยกรด, การขัดสี, ซิลิกาฟูม, เถ้าถ่านหิน

#### Abstract

The objective of this work was to investigate the resistance of concretes against acid corrosion and abrasive corrosion, which occurs in typical pig's farm floors, especially near the feeding machine. Two types of industrial waste, which good pozzolanic properties, were used as cement replacement material to improve acid resistance of concrete specimens. For the concrete mixtures, cement was replaced by silica fume or fly ash for 10 wt.%. compare to concrete with ordinary Portland cement and hydraulic cement binders. Two types of concrete specimens were prepared for testing compressive strength, acid corrosion, abrasion corrosion and acid-abrasion corrosion. The compressive strength test was conducted for 7, 14, 28, 56 and 84 days after casted. The results suggest silica fume effectively increases the compressive strength while fly ash slightly decreases. The resistance of the concrete against organic acid corrosion was improved by the substitution ordinary Portland cement by hydraulic cement and greatly improved when applying fly ash or silica fume as cement replacement. The improvement of abrasion resistance of concrete due to using hydraulic cement or cement replacement materials demonstrate similar trend compared to acid corrosion resistant tested results. Two testing machines, one for organic acid corrosion tests in wet-dried conditions and an abrasion testing machine with steel wheels, were developed to simulate the attack on concrete floors in pig farms. The concrete slab was cast and tested with a wet-dry switching system in an organic

acid solution cooperating with an abrasion test. The test results demonstrate that applying fly ash or silica fume is effective for increasing the resistance of the concrete against organic acid corrosion and abrasive corrosion.

Keywords: Concrete, Acid corrosion, Abrasion, Silica fume, Fly ash

## 1. คำนำ

ปัจจุบันการก่อสร้างในประเทศไทยยังคงมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง เพราะมีปัจจัยสำคัญดังต่อไปนี้ คือ การลงทุนก่อสร้างในโครงการขนาดใหญ่ของรัฐบาล การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของประเทศ และการลงทุนจากภาคเอกชน [1] รวมถึงการก่อสร้างอาคารโรงงานทางเกษตรและปศุสัตว์ยังคงมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องเช่นกัน เนื่องจากมีความจำเป็นสำหรับการอุปโภคของประชากรในประเทศ โดยจำเป็นต้องดำเนินการก่อสร้างและบำรุงรักษาอาคารดังกล่าวให้เป็นไปตามมาตรฐาน โดยเฉพาะฟาร์มสุกร ซึ่งมีการกำหนดเกี่ยวกับการก่อสร้างพื้นคอก ควรเป็นพื้นคอนกรีตที่มีผิวพื้นไม่หยาบและไม่ลื่นจนเกินไป มีความลาดเอียง หรือเป็นพื้นแอสลิตเพื่อความสะดวกในการดูแลและทำความสะอาด การกำหนดอัตราส่วนพื้นที่คอกสุกรต่อตัวที่เหมาะสม คือ พื้นคอนกรีตประมาณ 1.2-1.5 ตารางเมตร/ตัว สำหรับพื้นแอสลิตประมาณ 1.0 ตารางเมตร/ตัว เป็นต้น [2] จากการสำรวจข้อมูลการเลี้ยงสุกรในประเทศไทยปี พ.ศ.2564 พบว่ามีการเลี้ยงสุกรจำนวน 13,103,887 ตัว คิดเป็นพื้นคอกสุกรที่เป็นพื้นคอนกรีตจำนวนมากถึง 15,724,665 ตารางเมตร [3] เมื่อมีการเลี้ยงสุกรในฟาร์มนานเป็นระยะเวลาหนึ่งพื้นฟาร์มสุกรซึ่งเป็นพื้นคอนกรีตมักเกิดการชำรุดเสียหาย ซึ่งจำเป็นต้องดำเนินการซ่อมแซม และบำรุงรักษาให้มีคุณภาพตามมาตรฐานอยู่เสมอ ลักษณะการชำรุดเสียหายของพื้นฟาร์มที่พบ คือ ที่ผิวบนของพื้นคอนกรีตมี การหลุดร่อนของคอนกรีตเป็นหลุมจมนองเห็นก่อนหินที่อยู่เนื้อคอนกรีต โดยเฉพาะบริเวณที่ให้อาหารแก่สุกร พื้นคอนกรีตจะเกิดการชำรุดเป็นอย่างมากดังแสดงในรูปที่ 1 ส่งผลให้สุกรเกิดการบาดเจ็บจากการเป็นแผลที่เท้าได้ โดยทั่วไปจะมีการซ่อมแซมพื้นฟาร์มสุกร 1 ปี/ครั้ง สำหรับพื้นฟาร์มที่เป็นคอนกรีต และซ่อมแซม 2 ปี/ครั้ง สำหรับพื้นฟาร์มแบบแอสลิต ทำให้มีต้นทุนในการเลี้ยงสุกรเพิ่มขึ้น



รูปที่ 1 การชำรุดเสียหายของพื้นฟาร์มสุกร

สาเหตุที่พื้นคอนกรีตเกิดความเสียหายเนื่องจากพื้นฟาร์มสุกรปกติแล้วจะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด [4] ทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์  $Ca(OH)_2$

ในพื้นที่คอนกรีตทำปฏิกิริยากับกรด (HX) เกิดเป็นเกลือของแคลเซียม ( $CaX_2$ ) ซึ่งสามารถละลายไปกับน้ำได้ทำให้คอนกรีตเกิดการกัดกร่อนขึ้น [5] ดังแสดงในสมการที่ (1)



แนวทางการพัฒนาคอนกรีตให้สามารถทนทานต่อกรดสามารถทำได้โดยใช้หลักการคือ การพยายามทำให้กรดเข้าไปในเนื้อคอนกรีตน้อยที่สุดด้วยการใช้วัสดุพอซโซลานมาทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อลดรูพรุน และลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลง และได้สารช่วยยึดประสานแทนดังแสดงในสมการที่ (2) ส่งผลให้คอนกรีตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้ [5]



นอกจากนั้นแล้วพฤติกรรมของสุกรที่มักคุ้ยเขี่ยที่พื้นบ่อยๆ รวมทั้งการใช้น้ำที่มีแรงดันสูงฉีดทำความสะอาดพื้นฟาร์มสุกร ส่งผลให้พื้นคอนกรีตชำรุดเสียหายรวดเร็วขึ้นด้วย [6] จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาเพื่อพัฒนาคอนกรีตให้สามารถป้องกันการกัดกร่อนโดยกรดและการขัดสีเพื่อประยุกต์ใช้กับพื้นฟาร์มสุกรได้

## 2. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้มีขั้นตอนวิธีการศึกษาตามลำดับต่อไปนี้คือ วัสดุที่ใช้ในการวิจัย สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน สมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน ส่วนผสมของคอนกรีต การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต การทดสอบการกัดกร่อนโดยกรด การทดสอบการกัดกร่อนจากการขัดสี และการทดสอบการกัดกร่อนโดยกรดรวมกับการขัดสี

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยนี้ศึกษาความสามารถของคอนกรีตต่อการต้านทานการกัดกร่อนโดยกรดรวมกับการขัดสี ตามลักษณะการใช้งานจริงของฟาร์มเลี้ยงสุกรในประเทศไทย โดยแบ่งคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัยออกเป็น 4 ประเภท คือ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC), คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC), คอนกรีตที่แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (10SF), และคอนกรีตที่แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (10SF)

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC) ซิลิกาฟูม (SF) เถ้าถ่านหิน (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มวลรวมหยาบใช้หินปูนร้อนผ่านตะแกรง 3/4 นิ้วและค้ำงเบอร์ 4 ค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าการดูดซึมน้ำของทรายและหินจากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C128-15 และ ASTM C127-15, [7, 8] แสดงในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** ค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าการดูดซึมน้ำของทรายและหิน

วัสดุผสมรวม	ความถ่วงจำเพาะ	การดูดซึมน้ำ
ทราย	2.63	0.40
หิน	2.70	0.26

**2.2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน**

สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน OPC, HC, SF, และ FA สามารถหาค่าความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C188-95, [9] ซึ่งสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน

วัสดุประสาน	OPC	HC	SF	FA
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	3.10	2.21	2.20

**2.3 สมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน**

วัสดุประสาน OPC ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150, [10] วัสดุประสาน HC ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (ปูนทนน้ำทะเล) ตามมาตรฐาน ASTM C595 TYPE IP, [11] ส่วนวัสดุประสาน SF และ FA มีองค์ประกอบหลักทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน

Chemical composition (%)	Silica fume	Fly ash
Silicon dioxide (SiO <sub>2</sub> )	93.51	35.89
Aluminum oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.00	19.26
Ferric oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.22	10.64
Calcium oxide (CaO)	2.06	16.08
Magnesium oxide (MgO)	0.40	2.45
Potassium oxide (K <sub>2</sub> O)	0.34	2.31
Sodium oxide (Na <sub>2</sub> O)	0.05	1.05
Sulfur trioxide (SO <sub>3</sub> )	0.56	4.08

จากตารางที่ 3 พบว่าองค์ประกอบหลักทางเคมีของ SF ได้แก่ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีปริมาณผลรวมเท่ากับร้อยละ 93.73 มีค่า CaO ต่ำกว่าร้อยละ 10 จึงจัดเป็นปอซโซลาน Class F ส่วนองค์ประกอบหลักทางเคมีของ FA ได้แก่ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีปริมาณผลรวมเท่ากับร้อยละ 65.79 มีค่า CaO สูงกว่าร้อยละ 10 จึงจัดเป็นปอซโซลาน Class C เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C618, [12]

**2.4 ส่วนผสมของคอนกรีต**

ส่วนผสมของคอนกรีตในการวิจัยนี้มุ่งเน้นให้สอดคล้องกับการใช้งานจริงมากที่สุดเพื่อให้สามารถได้ผลการวิจัยที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ อย่างแท้จริงโดยกำหนดให้คอนกรีตทุกส่วนผสมใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ

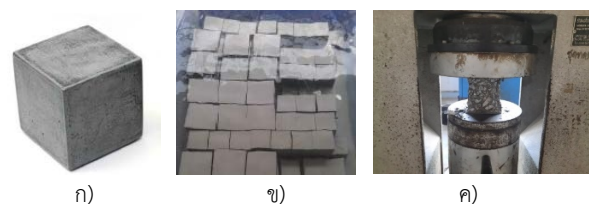
ประสาน (W/B) เท่ากับ 0.42, [13] ใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมการยุบตัวให้เท่ากับ 10±2.5 เซนติเมตร คอนกรีตควบคุม OPC (Control) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้เท่ากับ 400 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร คอนกรีต HC ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 400 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ส่วนคอนกรีต 10SF และ 10FA มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่มและเถ้าถ่านหินตามลำดับ ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4

**ตารางที่ 4** ส่วนผสมของคอนกรีต

Mix	OPC	HC	SF	FA
Ordinary Portland Cement (kg/m <sup>3</sup> )	400	-	360	360
Hydraulic Cement (kg/m <sup>3</sup> )	-	400	-	-
Silica Fume (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	40	-
Fly Ash (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	40
Coarse Aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	1,050	1,050	1,037	1,042
Fine Aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	771	771	763	765
Water (kg/m <sup>3</sup> )	168	168	168	168

**2.5 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต**

การวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างก้อนคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร เมื่อหล่อแล้วทิ้งไว้ในแบบ 24 ชั่วโมง หลังจากแกะแบบแล้วนำลูกปูนไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัว และนำมาทดสอบการรับกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C109, [14] ดังแสดงในรูปที่ 2 ที่อายุ 7, 14, 28, 56, และ 84 วัน ใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง [15]



**รูปที่ 2** การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ก) ก้อนคอนกรีตขนาด 10x10x10 เซนติเมตร ข) การบ่มคอนกรีตในน้ำปูนขาวอิ่มตัว ค) การกดก้อนคอนกรีตด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดคอนกรีต

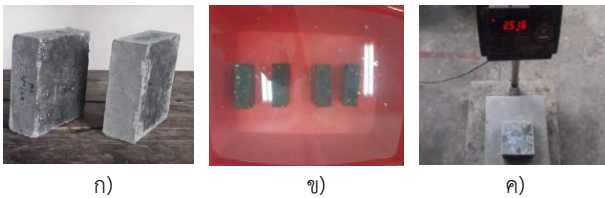
**2.6 การทดสอบการกัดกร่อนโดยกรด**

การทดสอบการกัดกร่อนโดยกรดใช้ก้อนคอนกรีตขนาด 15x15x5 เซนติเมตร เมื่อหล่อแล้วทิ้งไว้ในแบบ 24 ชั่วโมง หลังจากแกะแบบแล้วนำลูกปูนไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 56 วัน จากนั้นนำก้อนคอนกรีตขึ้นมาจมน้ำปูนขาวอิ่มตัว ซึ่งน้ำหนักก้อนคอนกรีต บันทึกค่าน้ำหนัก (W<sub>1</sub>) นำก้อนคอนกรีตไปแช่ในสารละลายกรดอะซิติก (Acetic Acid) ความเข้มข้นกรดร้อยละ 98 ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยมีกรควบคุมให้สารละลายกรดมีค่า pH = 2.5±0.1 ทำการเปลี่ยนสารละลายกรดที่แช่คอนกรีตทุก 7 วัน นำก้อนคอนกรีตมาชั่งน้ำหนักและบันทึกผล (W<sub>2</sub>) เมื่อแช่ในสารละลาย

กรดครบ 7, 14, 21, 28, 42, 56, และ 70 วัน ตามลำดับ คำนวณร้อยละการสูญเสียมวลของคอนกรีต (%Loss) [16, 17] ได้แสดงในสมการที่ (2)

$$\%Loss = 100 - ((W_2 / W_1) \times 100) \quad (3)$$

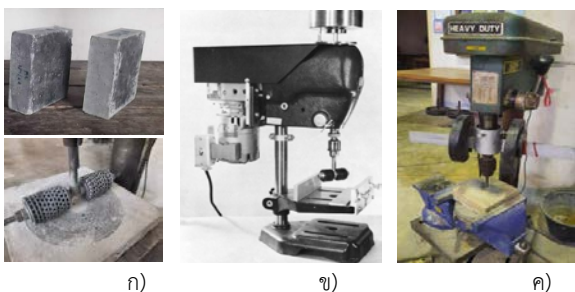
เมื่อ %Loss = ร้อยละการสูญเสียมวลของคอนกรีต  
 $W_1$  = น้ำหนักของคอนกรีตก่อนแช่กรด, (กิโลกรัม)  
 $W_2$  = น้ำหนักของคอนกรีตหลังการแช่กรดระยะเวลาต่าง ๆ, (กิโลกรัม)



รูปที่ 3 การทดสอบการกัดกร่อนโดยกรด ก) ก้อนคอนกรีตขนาด 10x10x5 เซนติเมตร ข) การแช่คอนกรีตในสารละลายกรด ค) การชั่งน้ำหนักก้อนคอนกรีตด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 กรัม

### 2.7 การทดสอบการกัดกร่อนโดยการขัดสี

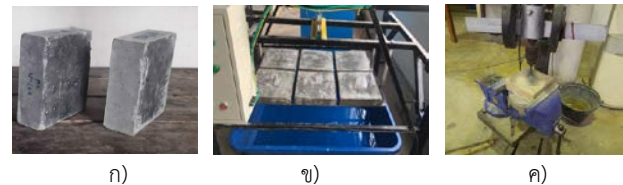
การทดสอบการกัดกร่อนโดยการขัดสีใช้ก้อนคอนกรีตขนาด 15x15x5 เซนติเมตร เมื่อหล่อแล้วทิ้งไว้ในแบบ 24 ชั่วโมง หลังจากแกะแบบแล้วนำลูกปูนไปปมในน้ำปูนขาวอิมตัวเป็นเวลา 56 วัน จากนั้นนำก้อนคอนกรีตขึ้นมาจากน้ำปูนขาวอิมตัว ทิ้งไว้ให้ก้อนคอนกรีตแห้งในอากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักก้อนคอนกรีต ( $W_1$ ) นำก้อนคอนกรีตไปขัดสีด้วยเครื่องทดสอบการขัดสีคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C994, [18] ดังแสดงในรูปที่ 4 ใช้เวลาขัด 5 นาที จากนั้นนำก้อนคอนกรีตมาชั่งน้ำหนัก ( $W_2$ ) คำนวณร้อยละการสูญเสียมวลของคอนกรีต (%Loss) ดังแสดงในสมการที่ (3) บันทึกผลการสูญเสียมวลของคอนกรีตรอบที่ 1 และดำเนินการทดสอบด้วยกระบวนการเดียวกันนี้ต่อเนื่องเป็นจำนวนทั้งหมด 5 รอบ



รูปที่ 4 การทดสอบการกัดกร่อนจากการขัดสี ก) ก้อนคอนกรีตขนาด 10x10x5 เซนติเมตร ข) เครื่องทดสอบการขัดสีคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C994 ค) การขัดก้อนคอนกรีต

### 2.8 การทดสอบการกัดกร่อนโดยกรดร่วมกับการขัดสี

การทดสอบการกัดกร่อนโดยกรดร่วมกับการขัดสีใช้ก้อนคอนกรีตขนาด 15x15x5 เซนติเมตร เมื่อหล่อแล้วทิ้งไว้ในแบบ 24 ชั่วโมง หลังจากแกะแบบแล้วนำลูกปูนไปปมในน้ำปูนขาวอิมตัวเป็นเวลา 56 วัน ชั่งน้ำหนักก้อนคอนกรีต ( $W_1$ ) จากนั้นนำก้อนคอนกรีตไปแช่ในสารละลายกรดอะซิติก ความเข้มข้นร้อยละ 98 ที่มีการควบคุมให้สารละลายกรดมีค่า pH = 2.5±0.1 มีการตรวจสอบค่า pH ทุกวัน การนำก้อนคอนกรีตมาแช่สารละลายกรดนี้มีการออกแบบเครื่องมือแช่กรดให้สามารถแช่กรดเฉพาะผิวด้านล่างของก้อนคอนกรีต และสามารถยกก้อนคอนกรีตขึ้น-ลงได้ทุก 1 ชั่วโมงเพื่อให้ก้อนคอนกรีตอยู่ในสภาวะเปียก-แห้ง สลับไปมา เนื่องจากเป็นสภาวะที่คอนกรีตถูกกัดกร่อนมากที่สุด [19, 4] ลักษณะเครื่องมือแช่กรดในสภาวะเปียก-แห้งแสดงดังรูปที่ 5 เมื่อแช่ก้อนคอนกรีตเป็นเวลา 48 ชั่วโมงแล้วนำก้อนคอนกรีตออกจากเครื่องแช่ทิ้งไว้ให้ก้อนคอนกรีตแห้งในอากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำก้อนคอนกรีตไปขัดสีด้วยเครื่องทดสอบการขัดสีคอนกรีต ใช้เวลาขัด 5 นาที จากนั้นนำก้อนคอนกรีตมาชั่งน้ำหนัก ( $W_2$ ) คำนวณร้อยละการสูญเสียมวลของคอนกรีต (%Loss) ดังแสดงในสมการที่ (1) บันทึกผลการสูญเสียมวลของคอนกรีตรอบที่ 1 และดำเนินการทดสอบด้วยกระบวนการเดียวกันนี้ต่อเนื่องเป็นจำนวนทั้งหมด 5 รอบ

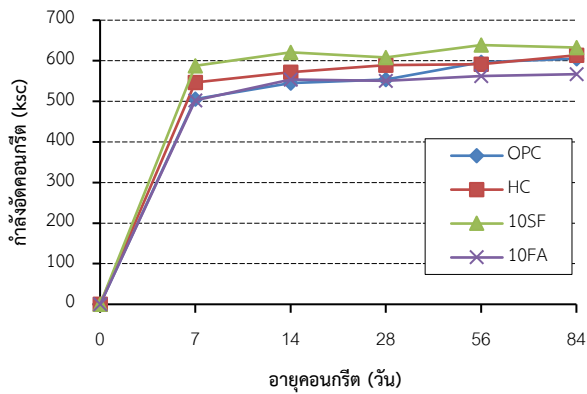


รูปที่ 5 การทดสอบการกัดกร่อนโดยกรดร่วมกับการขัดสี ก) ก้อนคอนกรีตขนาด 10x10x5 เซนติเมตร ข) เครื่องมือแช่กรดในสภาวะเปียก-แห้ง ค) การขัดก้อนคอนกรีต

## 3. ผลการทดสอบ

### 3.1 กำลังอัดของคอนกรีต

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของคอนกรีตแสดงได้รูปที่ 5 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตทุกอัตราส่วนผสมมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน ที่อายุ 7 วัน คอนกรีตควบคุม OPC (Control), HC, 10SF, และ 10FA มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 505.47, 546.50, 587.35, และ 502.70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรเรียงตามลำดับค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเส้นกราฟกำลังอัดมีความชันสูง จากนั้นเมื่อคอนกรีตมีอายุ 14, 28, 56, และ 84 วัน พบว่าคอนกรีตทุกอัตราส่วนผสมมีค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดค่อนข้างคงที่ เส้นกราฟกำลังอัดมีความชันน้อย คอนกรีตที่อายุ 84 วัน ที่มีค่ากำลังอัดสูงสุดเรียงตามลำดับดังนี้ 10SF, HC, OPC, และ 10SF โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 632.60, 613.55, 605.20, และ 566.97 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของคอนกรีต

คอนกรีต HC ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 546.50, 571.60, 588.95, 591.45, และ 613.55 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 7, 14, 28, 56, และ 84 วัน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม OPC ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 505.47, 545.25, 554.10, 596.07, และ 605.20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 7, 14, 28, 56, และ 84 วัน ตามลำดับ พบว่าคอนกรีต HC สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงกว่า คอนกรีต OPC เพียงเล็กน้อยในช่วงแรกของอายุคอนกรีต แต่ในช่วงปลายของอายุคอนกรีตพบว่าคอนกรีต HC และคอนกรีต OPC มีค่ากำลังอัดที่แทบจะไม่แตกต่างกัน

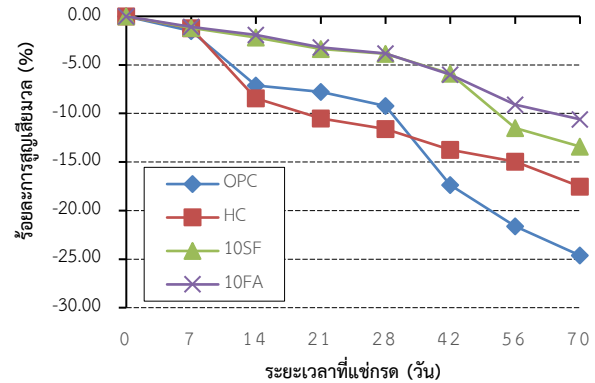
คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (10SF) พบว่ามีค่ากำลังอัดเท่ากับ 587.35, 620.50, 608.20, 638.70, และ 632.60 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 7, 14, 28, 56, และ 84 วัน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต OPC พบว่ามีค่ากำลังอัดสูงกว่าเพียงเล็กน้อยที่อายุเดียวกัน เนื่องจากอนุภาคของซิลิกาฟูมมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อย่างรวดเร็วและทำให้อัตราการเกิดกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นด้วย [20]

คอนกรีตที่ใช้ถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (10FA) พบว่ามีค่ากำลังอัดเท่ากับ 502.70, 554.00, 550.90, 562.73, และ 566.97 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 7, 14, 28, 56, และ 84 วัน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต OPC พบว่ามีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกันมากในช่วงแรกที่อายุคอนกรีต 7, 14, และ 28 วัน ส่วนที่อายุคอนกรีต 56 และ 84 วันคอนกรีต 10FA มีการพัฒนากำลังอัดที่ต่ำกว่าเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานที่เข้าร่วมกับปูนซีเมนต์ได้โดยจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้สารเชื่อมประสานเช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และผลทำให้มีกำลังอัดสูงขึ้นในระยะยาวได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของถ่านหินด้วย [21]

### 3.2 การทดสอบการกัดกร่อนโดยกรด

จากรูปที่ 6 พบว่าการเสื่อมสภาพของคอนกรีตควบคุม OPC มีค่าสูงที่สุดเป็นจำนวนร้อยละ 1.51, 7.11, 7.78, 9.22, 17.37, 21.61, และ 24.63 เมื่อแช่กรดเป็นระยะเวลา 7, 14, 21, 28, 42, 56, และ 70 วันตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตชนิดอื่นๆ เนื่องจากปฏิกิริยาของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

(Ca(OH)<sub>2</sub>) ในคอนกรีตและสารละลายกรด ส่งผลให้เกิดเกลือแคลเซียม (Calcium salt) ซึ่งมีคุณสมบัติง่ายต่อการชะล้างซึ่งทำให้เกิดความไม่เสถียรในโครงสร้างคอนกรีต โดยคอนกรีต 10FA, 10SF, และ HC มีร้อยละการสูญเสียมวลที่น้อยกว่าคอนกรีตควบคุม OPC อย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 7 การสูญเสียมวลจากการกัดกร่อนโดยกรด

คอนกรีต HC มีร้อยละการสูญเสียมวลเท่ากับ 1.21, 8.44, 10.52, 11.59, 13.71, 14.97, และ 17.53 เมื่อแช่กรดเป็นระยะเวลา 7, 14, 21, 28, 42, 56, และ 70 วันตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต OPC พบว่าในช่วงแรกการสูญเสียมีค่าน้อยกว่า แต่หลังจากแช่กรดเป็นระยะเวลา 42 วันไปแล้วพบว่าการสูญเสียมวลน้อยกว่าคอนกรีต OPC เนื่องจากคอนกรีต HC คือคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ที่มีสารอินทรีย์ปอซโซลานผสมอยู่มีผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้น [22] กรดจึงแทรกซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้น้อย การสูญเสียมวลจึงน้อยตามไปด้วย

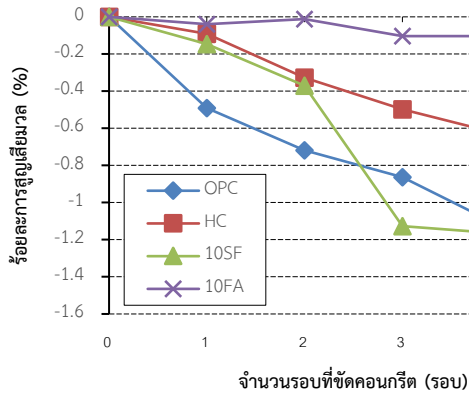
คอนกรีต 10SF มีร้อยละการสูญเสียมวลเท่ากับ 1.19, 2.18, 3.35, 3.85, 5.91, 11.50, และ 13.41 เมื่อแช่กรดเป็นระยะเวลา 7, 14, 21, 28, 42, 56, และ 70 วันตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต OPC พบว่ามีค่าร้อยละการสูญเสียมวลน้อยกว่าคอนกรีต OPC ในทุกระยะเวลาที่แช่กรด เนื่องจากคอนกรีต 10SF มีซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทำหน้าที่เป็นวัสดุประสาน ซึ่งซิลิกาฟูมมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์สามารถเข้าไปเติมรูพรุนในเนื้อคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้มีความหนาแน่นมากกว่าคอนกรีต OPC [23] ทำให้กรดแทรกซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้ยาก การถูกกัดกร่อนโดยกรดจึงน้อย การสูญเสียมวลจึงน้อยตามไปด้วย

คอนกรีต 10FA มีร้อยละการสูญเสียมวลเท่ากับ 1.10, 1.92, 3.19, 3.83, 5.98, 9.11, และ 10.60 เมื่อแช่กรดเป็นระยะเวลา 7, 14, 21, 28, 42, 56, และ 70 วันตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต OPC พบว่าการสูญเสียมวลที่น้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากคอนกรีต 10FA มีถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์อยู่บางส่วนทำหน้าที่เป็นวัสดุประสาน ซึ่งช่วยลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์(Ca(OH)<sub>2</sub>) ลงได้ การกัดกร่อนโดยกรดจึงลดลง [24]

### 3.3 การทดสอบการกัดกร่อนโดยการขัดสี

จากรูปที่ 7 พบว่าการสูญเสียมวลของคอนกรีตควบคุม OPC มีค่าสูงที่สุดเป็นจำนวนร้อยละ 0.49, 0.72, 0.86, 1.13, และ 1.44 เมื่อนำก้อน

คอนกรีตมาขัดด้วยเครื่องขัดเป็นเวลา 5 นาที/รอบ จำนวน 5 รอบเรียงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตชนิดอื่นพบว่าเมื่อขัดคอนกรีตจนถึงรอบที่ 5 คอนกรีต 10FA มีการสูญเสียมวลน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามในภาพรวมทั้งหมดพบว่า การสูญเสียมวลจากการกัดกร่อนโดยการขัดมีค่าน้อยมาก คือ ร้อยละ 0.04-1.44 เท่านั้น



รูปที่ 8 การสูญเสียมวลจากการกัดกร่อนโดยการขัดสี

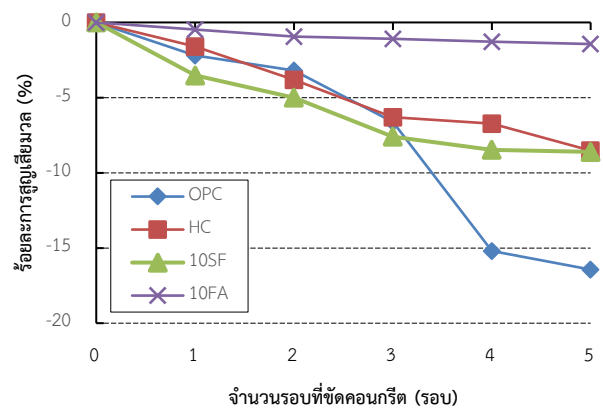
คอนกรีต HC มีร้อยละการสูญเสียมวลเท่ากับ 0.09, 0.33, 0.50, 0.63, และ 1.22 เมื่อนำก่อนคอนกรีตมาขัดด้วยเครื่องขัดเป็นเวลา 5 นาที/รอบ จำนวน 5 รอบเรียงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต OPC พบว่าการสูญเสียมวลน้อยกว่า คอนกรีต OPC ทุกรอบของการขัด

คอนกรีต 10SF มีร้อยละการสูญเสียมวลเท่ากับ 0.15, 0.37, 1.13, 1.17, และ 1.34 เมื่อนำก่อนคอนกรีตมาขัดด้วยเครื่องขัดเป็นเวลา 5 นาที/รอบ จำนวน 5 รอบเรียงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต OPC พบว่าหลังจากการขัดรอบที่ 1-2 คอนกรีต 10SF มีร้อยละการสูญเสียมวลน้อยกว่าคอนกรีต OPC หลังจากการขัดรอบที่ 3-4 คอนกรีต 10SF มีร้อยละการสูญเสียมวลมากกว่าคอนกรีต OPC และหลังจากการขัดรอบที่ 5 พบว่าคอนกรีต 10SF มีค่าการสูญเสียมวลน้อยกว่าคอนกรีต OPC เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

คอนกรีต 10FA มีร้อยละการสูญเสียมวลเท่ากับ 0.04, 0.01, 0.10, 0.10, และ 0.04 เมื่อนำก่อนคอนกรีตมาขัดด้วยเครื่องขัดเป็นเวลา 5 นาที/รอบ จำนวน 5 รอบเรียงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต OPC พบว่ามีค่าการสูญเสียมวลน้อยกว่าคอนกรีต OPC เป็นอย่างมาก และเป็นคอนกรีตที่สูญเสียมวลน้อยที่สุดสำหรับคอนกรีตทุกส่วนผสม

### 3.4 การทดสอบการกัดกร่อนโดยกรดร่วมกับการขัดสี

จากรูปที่ 8 พบว่าการสูญเสียมวลของคอนกรีตควบคุม OPC มีค่าสูงที่สุดเป็นจำนวนร้อยละ 2.20, 3.20, 6.62, 15.19, และ 16.43 เมื่อนำก่อนคอนกรีตมาขัดด้วยเครื่องขัดเป็นเวลา 5 นาที/รอบ จำนวน 5 รอบเรียงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตชนิดอื่นพบว่าเมื่อขัดคอนกรีตจนถึงรอบที่ 5 คอนกรีต 10FA มีการสูญเสียมวลน้อยที่สุดอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 9 การสูญเสียมวลจากการกัดกร่อนโดยกรดร่วมกับการขัดสี

คอนกรีต HC มีร้อยละการสูญเสียมวลเท่ากับ 1.61, 3.82, 6.30, 6.74, และ 8.52 เมื่อนำก่อนคอนกรีตมาขัดด้วยเครื่องขัดเป็นเวลา 5 นาที/รอบ จำนวน 5 รอบเรียงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต OPC พบว่าการสูญเสียมวลที่ใกล้เคียงกับคอนกรีต OPC ภายหลังจากการขัดรอบที่ 1-3 และมีการสูญเสียมวลน้อยกว่าคอนกรีต OPC เป็นอย่างมากภายหลังจากการขัดรอบที่ 4-5

คอนกรีต 10SF มีร้อยละการสูญเสียมวลเท่ากับ 3.52, 5.00, 7.60, 8.47, และ 8.61 เมื่อนำก่อนคอนกรีตมาขัดด้วยเครื่องขัดเป็นเวลา 5 นาที/รอบ จำนวน 5 รอบเรียงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต OPC พบว่าการสูญเสียมวลที่มากกว่าคอนกรีต OPC เพียงเล็กน้อยภายหลังจากการขัดรอบที่ 1-3 และมีการสูญเสียมวลน้อยกว่าคอนกรีต OPC เป็นอย่างมากภายหลังจากการขัดรอบที่ 4-5 เช่นเดียวกับคอนกรีต HC

คอนกรีต 10FA มีร้อยละการสูญเสียมวลเท่ากับ 0.48, 0.94, 1.10, 1.27, และ 1.44 เมื่อนำก่อนคอนกรีตมาขัดด้วยเครื่องขัดเป็นเวลา 5 นาที/รอบ จำนวน 5 รอบเรียงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต OPC พบว่ามีค่าการสูญเสียมวลน้อยกว่าคอนกรีต OPC เป็นอย่างมาก และเป็นคอนกรีตที่สูญเสียมวลน้อยที่สุดสำหรับคอนกรีตทุกส่วนผสม

## 4. บทสรุป

จากผลการศึกษาวิจัยสามารถสรุปสาระสำคัญได้ดังนี้ คือ

4.1 กำลังอัดของคอนกรีตทุกอัตราส่วนผสมมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน คือมีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อคอนกรีตมีอายุ 7 วัน และมีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อคอนกรีตมีอายุ 14, 28, 56, และ 84 วัน ตามลำดับ

4.2 คอนกรีต OPC มีการสูญเสียมวลจากการกัดกร่อนโดยกรดมากที่สุดเมื่อแช่กรดเป็นเวลายาวนาน ส่วนคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลาน (HC, 10SF, 10FA) มีแนวโน้มในการต้านทานการกัดกร่อนของกรดได้ดีกว่าคอนกรีต OPC โดยเฉพาะคอนกรีต 10FA ซึ่งมีการสูญเสียมวลจากการกัดกร่อนโดยกรดน้อยที่สุด

4.3 คอนกรีต 10FA มีการสูญเสียมวลจากการกัดกร่อนโดยการซัดสี น้อยที่สุดอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับคอนกรีตส่วนผสมอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามคอนกรีตทุกส่วนผสมมีการสูญเสียมวลจากการกัดกร่อนโดยการซัดสีมีค่าน้อยมาก คือ ร้อยละ 0.04-1.44 เท่านั้น

4.4 คอนกรีตที่ผสมวัสดุขุขี้เถ้า (HC, 10SF, 10FA) มีแนวโน้มในการต้านทานการกัดกร่อนโดยกรดรวมกับการซัดสีได้ดีกว่าคอนกรีต OPC แสดงให้เห็นว่าการใช้ซิลิกาฟุ่มหรือเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ช่วยเพิ่มความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนโดยกรดรวมกับการซัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาด ซึ่งเป็นการลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตด้วยการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เป็นประโยชน์ และเป็นการช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์อีกด้วย [25]

## 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (แม่เมาะ) ที่ให้ความอนุเคราะห์เถ้าถ่านหิน (Fly Ash) และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ ซิลิกาฟุ่ม และสารลดน้ำพิเศษเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ธนาคารกรุงศรีอยุธยา จำกัด (มหาชน) (2564). *แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรมปี2564-2566:ธุรกิจรับเหมาก่อสร้าง*. [ออนไลน์]. จาก <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/Construction-Construction-Materials/Construction-Contractors/IO/io-Construction-Contractors-21>, [วันที่เข้าถึง 3 มิถุนายน 2565].
- [2] สมาคมสัตวแพทย์ควบคุมฟาร์มสุกรไทย (2563). *เกณฑ์กำหนดมาตรฐานฟาร์ม*. [ออนไลน์]. จาก <https://www.tsva.or.th/standard-of-pig-farm-criteria>, [วันที่เข้าถึง 3 มิถุนายน 2565].
- [3] กรมปศุสัตว์ (2564). *ข้อมูลเกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์และปศุสัตว์รายเดือน ปี 2564*. [ออนไลน์]. จาก <https://www.region6.dld.go.th/webnew/index.php/th/service-menu/stat-report>, [วันที่เข้าถึง 3 มิถุนายน 2565].
- [4] N. De Belie, J. Monteny, and L. Taerwe (2002). Accelerated Degradation Testing of Concrete In Acidic Environment: Resistance To Lactic And Sulfuric Acid. *9<sup>th</sup> International Conference : Durability of Building Materials and Components*. Vol. 2, pp. 1-10, 17-20 March 2002.

- [5] Anwar Khitab, Muhammad Tausif Arshad, Muhammad Tausif Arshad, and I. Khan (2013). Development of an Acid Resistant Concrete: a Review. *International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology*. Vol. 4, No. 2, pp. 33-38.
- [6] Nele De Belie, Marcel Debruyckere, Dirk Van Nieuwenburg, and Benny De Blaere (1997). Concrete Attack by Feed Acids: Accelerated Tests to Compare Different Concrete Compositions and Technologies. *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 16, pp. 1-9.
- [7] American Society for Testing and Materials (2001). ASTM C 127 : Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregates. *Annual Book of ASTM Standards*. Vol. 4, No. 12, pp. 64-68.
- [8] American Society for Testing and Materials (2001). ASTM C128 : Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate. *Annual Book of ASTM Standards*. Vol. 4, No. 2, pp. 69-73.
- [9] American Society for Testing and Materials (2001). ASTM C 188 : Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. *Annual Book of ASTM Standard*. Vol. 4, No. 11, pp. 179-180.
- [10] American Society for Testing and Materials (2007). ASTM C150 : Standard Specification for Portland Cement. *Annual Book of ASTM Standard*. pp. 1-8.
- [11] American Society for Testing and Materials (2010). ASTM C 595 : Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. *Annual Book of ASTM Standard*. pp. 1-8.
- [12] American Society for Testing and Materials (2001). ASTM C 618 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete. *Annual Book Standard of ASTM*. Vol. 4, No. 2, pp. 310-313.
- [13] I. B. Muhit, S. S. Ahmed, M. M. Amin, and M. T. Raihan (2013). Effects of Silica Fume and Fly Ash as Partial Replacement of Cement on Water Permeability and Strength of High Performance Concrete. *Association of Civil and Environmental Engineers*. pp. 108-115.

- [14] American Society for Testing and Materials (2001). ASTM C 109 : Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. *Annual Book of ASTM Standard*. Vol. 4, No. 1, pp. 83-88.
- [15] B. Pather, S.O. Ekolu และ H. Quainoo (2021). Effects of aggregate types on acid corrosion attack upon fly – Ash geopolymer and Portland cement concretes – Comparative study. *Construction and Building Materials*. pp. 1-14.
- [16] Zhen-Tian Chang, Xiu-Jiang Song, Robert Munn and Marton Marosszeky (2005). Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulphuric acid attack. *Cement and Concrete Research*. Vol. 35, pp. 1486 – 1494.
- [17] S. Barbhuiya and Davin Kumala (2017). Behaviour of a Sustainable Concrete in Acidic Environment. *Sustainability*. pp. 1-13.
- [18] American Society for Testing and Materials (1999). ASTM C 944 : Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method. *Annual Book for ASTM Standards*. Vol. 4, No. 12, pp. 1-4.
- [19] Elke Gruyaert, Philip Van den Heede, Mathias Maes and Nele De Belie (2012). Investigation of the influence of blast-furnace slag on the resistance of concrete against organic acid or sulphate attack by means of accelerated degradation tests. *Cement and Concrete Research*. Vol. 42, pp. 173-185.
- [20] บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา (2553). *คุณสมบัติและพฤติกรรมการรับแรงของคอนกรีต*. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 143-144.
- [21] สุวิมล สัจจาณิษฐ์ (2561). *คอนกรีตเทคโนโลยีขั้นสูง*. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัดโรจนพรีนติ้ง, หน้า 102-107.
- [22] จักรกริสน์ แซ่เล่า (2564). *ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกคืออะไร*. 8 มีนาคม 2564. [ออนไลน์]. จาก <https://www.ensyndrome.com/?p=1051>, [วันเข้าถึง 10 มิถุนายน 2565].
- [23] ปิติ สุนทรสุขกุล (2556). *คอนกรีต Concrete*, ปทุมธานี: สำนักพิมพ์วรรณกวี, หน้า 40-41.
- [24] ภาณุวัฒน์ จ้อยกัลด์ และพงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง (2562). *วิทยาการคอนกรีต*. นครนายก: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, หน้า 73 ของบทที่ 9.
- [25] ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ (2560). *วัสดุผสมซีเมนต์และคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม*. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.), หน้า 1-3.