

## สมบัติพื้นฐานและการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยวัสดุประสาน ต่างชนิดกัน

### Basic Properties and Carbonation of Concrete Replaced with Different Binders

บัญญัติ วารินทร์ไธ<sup>1\*</sup> ปิติศานต์ กร้ามาตร<sup>2</sup>

<sup>1</sup>อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Banyut Warinlai<sup>1\*</sup> Pitisan Krammart<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lecturer, Civil Engineering, Faculty of Science and Technology

Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom 73000, Thailand

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering

Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand

\*Corresponding author: Email: nowsurvey@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เป็นการศึกษาสมบัติพื้นฐานและความลึกการคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ผลการศึกษาพบว่า ความต้องการน้ำของเพสต์ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน ในขณะที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และของผงหินปูน มีค่ามากกว่าของ OPC ล้วน ส่วนระยะการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยและของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่ามากกว่าของ OPC ล้วน ในขณะที่ผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน และพบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่าของ OPC ล้วน ในขณะที่ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และของผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก ในขณะที่กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมผงหินปูน มีค่าใกล้เคียงกับของ OPC ล้วน นอกจากนี้ พบว่าความลึกการคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่ามากกว่าของ OPC ล้วน ในขณะที่ความลึกการคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าไม่มาก เมื่อเทียบกับของ OPC ล้วน โดยความลึกการคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่บ่มน้ำมีค่าน้อยกว่าของที่บ่มอากาศ และความลึกการคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระยะเวลานานกว่ามีค่ามากกว่าของที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้อยกว่า สุดท้ายสามารถเปรียบเทียบสมบัติพื้นฐานและการเกิดคาร์บอนเนชั่นระหว่างของเพสต์/คอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูนกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนได้

**คำสำคัญ:** สมบัติเบื้องต้น ความลึกการคาร์บอนเนชั่น เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ผงหินปูน

### ABSTRACT

This study was aimed to study the basic properties and the carbonation depth of partially replaced concrete with fly ash, granulated blast-furnace slag (GGBS) and limestone powder in ordinary Portland cement (OPC). The results showed that the water requirement of paste with fly ash was lesser than that of OPC paste. While the water requirement of paste made with GGBS and limestone powder was higher when compared to that of OPC paste. Additionally, the setting time of paste with fly ash and paste with GGBS was higher than that of OPC paste, while paste with limestone powder was lesser when compared to that of OPC paste. Moreover, the slump of concrete with fly ash was higher than that of OPC concrete whereas the slump of concrete with GGBS and limestone powder was lesser when compared to that of OPC concrete. The compressive strength of concrete with fly ash and GGBS was less than that of OPC concrete, especially when replaced in large quantity. Also, the compressive strength of concrete with limestone powder was close to that of OPC concrete. The carbonation depth of concrete with fly ash and GGBS was significantly higher than that of OPC concrete. The carbonation depth of concrete mixed with limestone powder was close to or little higher when compared to that of OPC concrete. The carbonation depth of concrete in water curing condition was lesser than that of concrete in air curing condition. The longer carbon dioxide exposure of concrete resulted in a greater carbonation depth than that of concrete with shorter carbon dioxide exposure. Finally, it can be compared the basic properties and the carbonation depth of concrete with fly ash, GGBS and limestone powder with OPC concrete.

**Keyword:** Basic properties, carbonation depth, fly ash, blast-furnace slag, limestone powder.

### 1. บทนำ

หลักการออกแบบโครงสร้างที่ดี คือการออกแบบเพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างที่สามารถรับน้ำหนักออกแบบตลอดอายุการใช้งานที่ต้องการ โดยปราศจากการซ่อมแซมในระดับที่เกินกว่าการคาดหมายเอาไว้ โดยปกติอายุการใช้งานที่ต้องการของโครงสร้างแต่ละชนิดไม่เท่ากันโดยขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้าง เช่น ขนาดสถานที่ที่โครงสร้างนั้นอยู่ และราคาของโครงสร้างนั้นๆ เป็นต้น โดยทั่วไปจะนิยมออกแบบโดยใช้ค่ากำลังอัดของคอนกรีต ( $f_c'$ ) และค่าการยุบตัวของคอนกรีต (slump) แต่ถ้านำคอนกรีตไปใช้ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน อายุของโครงสร้างจะไม่เท่ากัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง คอนกรีตจะมีคุณสมบัติทางกล

โดยเฉพาะคุณสมบัติการรับแรงต่ำลงไปตามกาลเวลา เนื่องจากถูกกระทำจากปัจจัยหลายอย่างในสิ่งแวดล้อมทั้งทางกายภาพ และทางเคมี เช่น การเสื่อมสภาพของคอนกรีตจาก คาร์บอนเนชั่น การกัดกร่อนโดยกรด การกัดกร่อนโดยซัลเฟต และการเสื่อมสภาพคลอไรด์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามในส่วนของการคาร์บอนเนชั่นที่เกิดในคอนกรีตจะมีผลเสียต่อความคงทนของคอนกรีต คือกรณีที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชั่นต่ำลงเนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ถูกใช้ในปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น ซึ่งจะทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ถ้าคาร์บอนเนชั่นเกิดเข้าไปจนถึงตำแหน่งเหล็กเสริมโดยทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลงจนใกล้จุดวิกฤติ

เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูนจัดเป็นวัสดุผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์ที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาวได้ (ปิติศานต์ และคณะ [1]) อย่างไรก็ตามปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน เพื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุประสานให้แน่ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการนำวัสดุดังกล่าวมาใช้ผสมร่วมในส่วนผสมคอนกรีต เพื่อเพิ่มความคงทนให้กับคอนกรีตที่เผชิญตามสภาพแวดล้อมต่างๆ จากผลการวิจัยในอดีตพบว่าอัตราการเกิดคาร์บอนขึ้นในคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น จากผลงานวิจัยในอดีตของ Roy et al. [2] พบว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ มีผลต่อการเกิดคาร์บอนขึ้น โดยความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 50-75 ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนขึ้นสูง ส่วนในกรณีของ Khunthongkeaw et al. [3] และ Atis et al. [4] พบว่าชนิดของวัสดุประสานมีผลต่อการเกิดคาร์บอนขึ้น โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้เกิดคาร์บอนขึ้นได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ Fattuhi [5] ยังพบอีกว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในอัตราที่สูงจะทำให้เกิดคาร์บอนขึ้นได้เร็วขึ้น

จากที่กล่าวมาการวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การนำเอาเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานร่วมด้วยผงหินปูน มาใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นส่วนผสมในคอนกรีตที่เสื่อมสภาพจากสาเหตุของคาร์บอนขึ้น เพื่อหาแนวโน้มสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตดังกล่าวให้มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น ตลอดจนแนวโน้มที่สามารถพัฒนาหรือปรับปรุงคุณสมบัติในด้านต่างๆ ของคอนกรีตให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานต่อไป โดยเฉพาะในด้านความคงทนของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมที่คอนกรีตต้องเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

## 2. วิธีการศึกษา

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้วัสดุประสานซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ใช้เถ้าลอย (โรงไฟฟ้าแม่เมาะ) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน (ขนาดเฉลี่ย 8 ไมโครเมตร) เป็นวัสดุประสานเพิ่มแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมวลรวมใช้หิน และทรายแม่น้ำ ส่วนน้ำใช้น้ำประปา

### 2.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วย 1) สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน ซึ่งได้แก่ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ความถ่วงจำเพาะ ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี 2) สมบัติของซีเมนต์และคอนกรีต ซึ่งได้แก่ ความต้องการน้ำและระยะการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และ 3) ความลึกคาร์บอนขึ้นของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.2.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน โดยความละเอียดโดยวิธีเบลนทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 204 [6] ความถ่วงจำเพาะ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188 [7] และภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคใช้วิธี scanning electronic microscope (SEM) โดยในส่วนองค์ประกอบทางเคมีนั้น ใช้วิธีวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

#### 2.2.2 สมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน

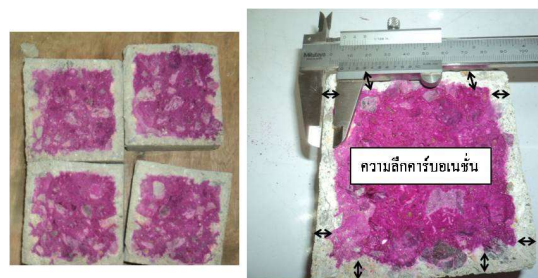
สำหรับสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานประกอบด้วยความต้องการน้ำและระยะการก่อตัวของเพสต์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 187 [8] และ ASTM C 191 [9] ตามลำดับ และค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 143 [10] และ BS 1881-116 [11] ตามลำดับ ในส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตใช้ตัวอย่างขนาด

100x100x100 มม. จำนวน 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งสัดส่วนผสม หลังจากถอดแบบ 1 วัน ทำการบ่มน้ำจนถึงเวลาทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน

### 2.2.3 ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต

ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109 [12] และ ASTM C 856 [13] ตัวอย่างคอนกรีตหลังจากหล่อลงแบบตัวอย่าง ทำการบ่มตัวอย่างในแบบ โดยถอดแบบที่อายุ 1 วัน แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่ม 2 แบบ คือบ่มอากาศและบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน หลังจากบ่มแต่ละแบบครบระยะเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างดังกล่าวไปบ่มในตู้เร่งการเกิดคาร์บอนเนชั่น (อุณหภูมิ  $30 \pm 5$  °C) โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) จะถูกปล่อยออกมาในปริมาณ 40,000 ppm และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 50 ถึง 55 ทั้งตัวอย่างให้ระยะเวลาที่เผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 วัน และ 56 วัน เมื่อครบอายุที่กำหนด นำตัวอย่างไปทดสอบหาค่าความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่น มีขั้นตอนการทดสอบ โดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ซีก โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต จากนั้นฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาเลอิน (Phenolphthalein) ที่ตัวอย่างซึ่งจะปรากฏเป็นสีม่วงในกรณีที่ไม่เกิดคาร์บอนเนชั่น แต่ในส่วนที่เกิด

คาร์บอนเนชั่นตัวอย่างคอนกรีตจะไม่มีสี ใช้เวอร์เนียวัดค่าความลึกบริเวณที่ไม่เกิดสีม่วง (บริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชั่น) ทั้งหมด 8 ตำแหน่งต่อคอนกรีตแต่ละซีกดังแสดงในรูปที่ 1 แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยค่าความลึกคาร์บอนเนชั่น



รูปที่ 1 การวัดความลึกคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีต

### 2.3 ส่วนผสมของเฟสและคอนกรีตที่ใช้

ปริมาณของวัสดุประสาน ที่ใช้ในการหาความต้องการน้ำและระยะการก่อตัวของเฟส แสดงดังตารางที่ 1 ส่วนตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการหาค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และความลึกคาร์บอนเนชั่น โดยคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ตลอดการศึกษา

ตารางที่ 1 ปริมาณของวัสดุประสานที่ใช้หาค่าความต้องการน้ำและระยะการก่อตัวของเฟส

| ส่วนผสม      | ปริมาณของวัสดุประสาน (กรัม)     |         |                             |          |
|--------------|---------------------------------|---------|-----------------------------|----------|
|              | ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 | เถ้าลอย | ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด | ผงหินปูน |
| PC           | 100                             | -       | -                           | -        |
| PC-20FA      | 80                              | 20      | -                           | -        |
| PC-40FA      | 60                              | 40      | -                           | -        |
| PC-30SL      | 70                              | -       | 30                          | -        |
| PC-50SL      | 50                              | -       | 50                          | -        |
| PC-5LP       | 95                              | -       | -                           | 5        |
| PC-10LP      | 90                              | -       | -                           | 10       |
| PC-15FA-5LP  | 80                              | 15      | -                           | 5        |
| PC-35FA-5LP  | 60                              | 35      | -                           | 5        |
| PC-10FA-10LP | 80                              | 10      | -                           | 10       |

ตารางที่ 1 ปริมาณของวัสดุประสานที่ใช้หาค่าความต้องการน้ำและระยะการก่อตัวของเพสต์ (ต่อ)

| ส่วนผสม      | ปริมาณของวัสดุประสาน (กรัม) |         |                |          |
|--------------|-----------------------------|---------|----------------|----------|
|              | ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์        | เถ้าลอย | ตะกรันเตาถลุง  | ผงหินปูน |
|              | ประเภทที่ 1                 |         | เหล็กบดละเอียด |          |
| PC-30FA-10LP | 60                          | 30      | -              | 10       |
| PC-25SL-5LP  | 70                          | -       | 25             | 5        |
| PC-45SL-5LP  | 50                          | -       | 45             | 5        |
| PC-20SL-10LP | 70                          | -       | 20             | 10       |
| PC-40SL-10LP | 50                          | -       | 40             | 10       |

หมายเหตุ PC หมายถึง เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน, PC-20FA หมายถึง เพสต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ PC-35FA-5LP หมายถึง เพสต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 35 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 เป็นต้น

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการหาค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และความลึกคาร์บอนเนชั่น

| สัดส่วนผสม   | ส่วนผสมของคอนกรีต (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) |         |           |    |      |       |     |
|--------------|---------------------------------------------|---------|-----------|----|------|-------|-----|
|              | ปูนซีเมนต์                                  | เถ้าลอย | ตะกรันเตา | ผง | ทราย | หิน   | น้ำ |
|              | ประเภทที่ 1                                 |         |           |    |      |       |     |
| CC           | 332                                         | -       | -         | -  | 970  | 1,080 | 182 |
| CC-20FA      | 266                                         | 67      | -         | -  | 970  | 1,080 | 182 |
| CC-40FA      | 200                                         | 133     | -         | -  | 970  | 1,080 | 182 |
| CC-30SL      | 233                                         | -       | 100       | -  | 970  | 1,080 | 182 |
| CC-50SL      | 166                                         | -       | 166       | -  | 970  | 1,080 | 182 |
| CC-5LP       | 316                                         | -       | -         | 17 | 970  | 1,080 | 182 |
| CC-10LP      | 299                                         | -       | 166       | 34 | 970  | 1,080 | 182 |
| CC-15FA-5LP  | 266                                         | 50      | -         | 17 | 970  | 1,080 | 182 |
| CC-35FA-5LP  | 200                                         | 117     | -         | 17 | 970  | 1,080 | 182 |
| CC-10FA-10LP | 266                                         | 34      | -         | 34 | 970  | 1,080 | 182 |
| CC-30FA-10LP | 200                                         | 100     | -         | 34 | 970  | 1,080 | 182 |
| CC-25SL-5LP  | 233                                         | -       | 83        | 17 | 970  | 1,080 | 182 |
| CC-45SL-5LP  | 166                                         | -       | 150       | 17 | 970  | 1,080 | 182 |
| CC-20SL-10LP | 233                                         | -       | 67        | 34 | 970  | 1,080 | 182 |
| CC-40SL-10LP | 166                                         | -       | 133       | 34 | 970  | 1,080 | 182 |

หมายเหตุ CC หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และ CC-20FA หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 เป็นต้น

### 3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์

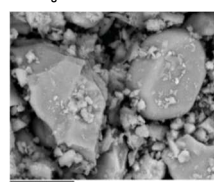
#### 3.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

จากการทดสอบสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียด และผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา ได้ผลการศึกษาขององค์ประกอบทางเคมี ความละเอียดโดยวิธีเบลน และความถ่วงจำเพาะ ดังแสดงในตารางที่ 3 ส่วนรูปที่ 2 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค โดยวิธี SEM ซึ่งขยาย 3,500 เท่า ซึ่งจะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างลักษณะของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับเถ้าลอย กล่าวคือ ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ผิวค่อนข้างขรุขระ

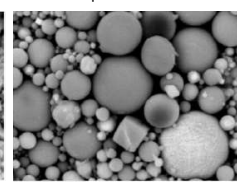
ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมี ความละเอียดโดยวิธีเบลน และความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสานที่ใช้

| องค์ประกอบทางเคมี (%)                        | ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 | ตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียด |          |       |
|----------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|----------|-------|
|                                              |                       | เถ้าลอย                      | ผงหินปูน |       |
| SiO <sub>2</sub>                             | 19.50                 | 35.71                        | 34.06    | 0.45  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>               | 4.97                  | 20.44                        | 16.27    | 0.05  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>               | 3.78                  | 15.54                        | 1.70     | 0.03  |
| CaO                                          | 65.38                 | 16.52                        | 36.05    | 55.20 |
| MgO                                          | 1.08                  | 2.00                         | 7.38     | 0.34  |
| SO <sub>3</sub>                              | 2.16                  | 4.26                         | 2.16     | <0.01 |
| Na <sub>2</sub> O                            | 0.22                  | 1.15                         | 0.21     | <0.01 |
| K <sub>2</sub> O                             | 0.47                  | 2.41                         | 1.09     | 0.01  |
| LOI                                          | 2.27                  | 0.49                         | 1.44     | 43.12 |
| fCaO                                         | 1.00                  | 1.71                         | -        | -     |
| ความละเอียดโดยวิธีเบลน(ชม. <sup>2</sup> /ก.) | 3,250                 | 2,867                        | 4,600    | 5,210 |
| ความถ่วงจำเพาะ                               | 3.12                  | 2.21                         | 2.96     | 2.69  |

ไม่เรียบ และมีอนุภาคหลายๆ ขนาดปนกันอยู่ ในขณะที่เถ้าลอยมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมและผิวค่อนข้างเรียบ แต่มีอนุภาคหลายๆ ขนาดปนกันอยู่เป็นจำนวนมากเช่นกัน ส่วนอนุภาคของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีลักษณะคล้ายๆ กับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือลักษณะเป็นเหลี่ยม ผิวค่อนข้างขรุขระไม่เรียบ และมีอนุภาคหลายๆ ขนาดปนกันอยู่ สำหรับผงหินปูนนั้นมีลักษณะของอนุภาคเป็นเหลี่ยม ผิวขรุขระไม่เรียบคล้ายกับกรณีของปูนซีเมนต์แต่มีขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่า

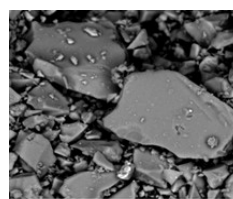


(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ต



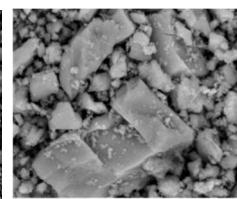
(ข) เถ้าลอย

แลนต์ประเภทที่ 1



(ค) ตะกรันเตาถลุงเหล็ก

บดละเอียด



(ง) ผงหินปูน

รูปที่ 2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสานโดยวิธี SEM กำลังขยาย 3,500 เท่า

#### 3.2 สมบัติของซีเมนต์และคอนกรีต

##### 3.2.1 ความต้องการน้ำของเพสต์

ผลการศึกษาความต้องการน้ำ (water requirement) ของเพสต์ แสดงดังรูปที่ 3 พบว่า ความต้องการน้ำของเพสต์ผสมเถ้าลอย (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) มีค่าน้อยกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของเถ้าลอยที่มีอนุภาคกลมจะช่วยให้การไหลดีขึ้น จึงทำให้มีความต้องการน้ำน้อย ส่วนความต้องการน้ำที่เหมาะสมทั้งของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (ทั้งร้อยละ 30 และ 50) และเพสต์ผสมผงหินปูน (ทั้งร้อยละ 5 และ 10) มีค่ามากกว่าของ เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ต

แลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่า รวมทั้งวัสดุดังกล่าวมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งแทนที่โดยน้ำหนัก ทำให้มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่การผสมด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับการผสมด้วยเถ้าลอย หรือตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด หรือผงหินปูนเพียงชนิดเดียว เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว

### 3.2.2 ระยะการก่อตัวของเพสต์

ผลการศึกษาระยะการก่อตัวของเพสต์ แสดงดังรูปที่ 4 พบว่า ระยะการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยและเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดช้ากว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการผสมด้วยเถ้าลอยและ/หรือผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดนั้น ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง อีกทั้งเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ซึ่งการทำให้ปฏิกิริยาเกิดช้า ส่วนระยะการก่อตัวของเพสต์ผสมผงหินปูน กลับพบว่าเร็วกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอนุภาคของผงหินปูนที่ค่อนข้างละเอียด สามารถเข้าไปแทรกกระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้อนุภาคปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำได้มากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดมากขึ้น [6] ส่วนเพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนและเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับการผสมด้วยเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเพียงอย่างเดียว เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว

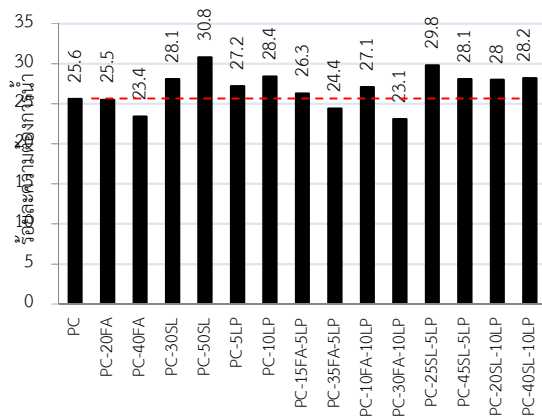
### 3.2.3 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ผลการศึกษาค่าการยุบตัวของคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 5 พบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคที่มีลักษณะกลม ซึ่งช่วยในการไหลเลื่อน ส่งผลให้มีค่าการยุบตัวมากขึ้น ส่วนค่าการยุบตัวของ

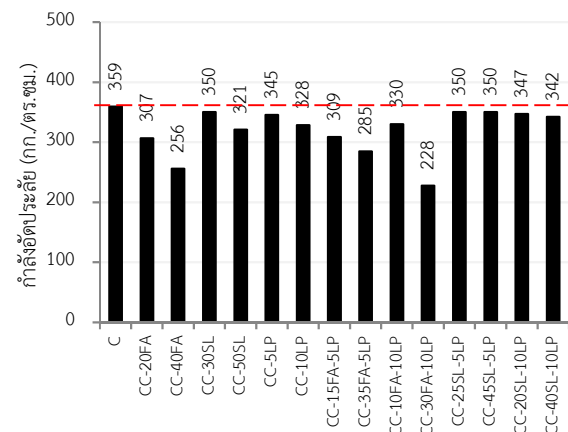
คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและของคอนกรีตผสมผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก ทั้งนี้เพราะตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนต่างก็มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 รวมทั้งความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่า ซึ่งเป็นการแทนที่โดยน้ำหนัก ส่วนค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนให้ค่ามีแนวโน้มที่สอดคล้องกับการผสมด้วยเถ้าลอยหรือตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเพียงอย่างเดียว เหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว

### 3.2.4 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

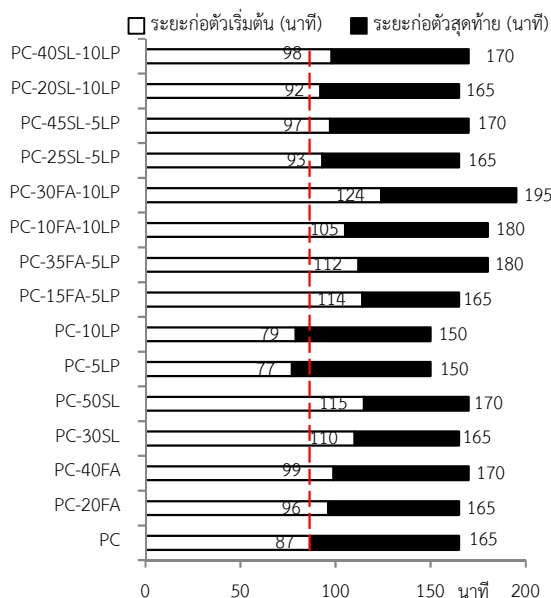
รูปที่ 6 แสดงค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต (อัตราส่วนน้ำต่อปูนวัสดุประสานเท่ากับ 0.55) โดยตัวอย่างคอนกรีตมีอายุ 28 วัน พบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตทั้งที่ผสมเถ้าลอยและผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก ทั้งนี้เนื่องจากการผสมด้วยเถ้าลอยและ/หรือผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดน้อย รวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดช้า ส่วนเมื่อผสมด้วยผงหินปูน ส่งผลให้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนที่ไม่มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อผสมผงหินปูน (ซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อย) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง แต่จากการที่ผงหินปูนมีอนุภาคที่ค่อนข้างละเอียด จึงเป็นการช่วยในการเติมเต็มในช่องว่างของเพสต์ ส่งผลให้กำลังต่ำลงไม่มากนัก ส่วนการผสมกรณี 3 วัสดุประสาน ก็ให้ผลในแนวโน้มที่สอดคล้องกับการผสมด้วย 2 วัสดุประสาน เหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว



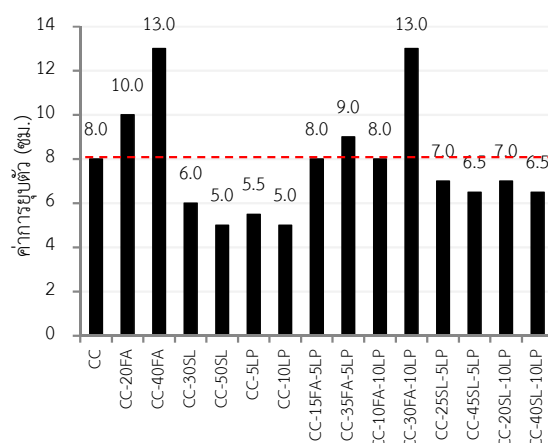
รูปที่ 3 ความต้องการน้ำของเพสต์



รูปที่ 6 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4 ระยะเวลาก่อตัวของเพสต์



รูปที่ 5 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

### 3.3 ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต

จากการทดสอบความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผสมผงหินปูนในครั้งนี้ ได้พิจารณาถึงผลกระทบต่อความลึกคาร์บอนเนชั่น 3 ประการ คือ 1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน 2) ผลกระทบจากวิธีการบ่มของตัวอย่างคอนกรีต และ 3) ผลกระทบจากระยะเวลาเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.3.1 ผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

รูปที่ 7 แสดงความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต ที่ระยะเวลาเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน และ 56 วัน โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มอากาศ 28 วัน และบ่มน้ำ 28 วัน ก่อนเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการศึกษาพบว่าทั้งสองวิธีการบ่มคอนกรีตนั้น ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (ทั้งระยะเวลาเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน และ 56 วัน) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง และปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งต่างก็มีส่วนทำให้ลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) จึงทำให้ความลึกคาร์บอนเนชั่นมากขึ้น ส่วนความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่า



ใกล้เคียงหรือสูงกว่าไม่มากเมื่อเทียบกับของคอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอุณหภูมิของผงหินปูนที่เล็กเข้าไปอุดโพรงช่องว่างในเพสต์ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เข้าไปได้ยากขึ้น จึงทำให้ความลึกการบอเนชั่นน้อยลง สำหรับกรณีของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร่วมด้วยผงหินปูน และผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดด้วยผงหินปูน การเกิดคาร์บอนเนชั่นมีทิศทางเดียวกันกับการผสมด้วยเถ้าลอย ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและ/หรือผสมผงหินปูนเพียงอย่างเดียว ด้วยเหตุผลและสมบัติของวัสดุที่กล่าวมาแล้ว

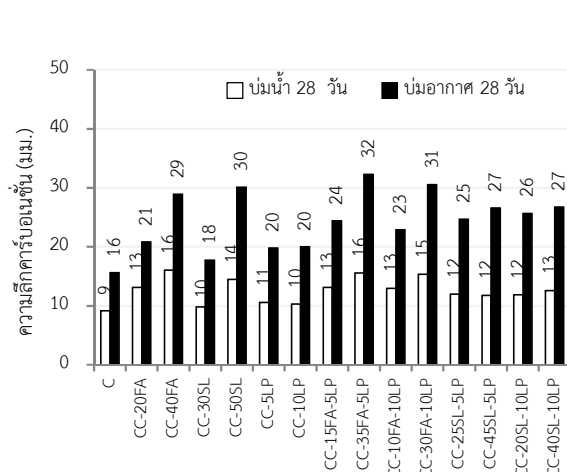
### 3.3.2 ผลกระทบของวิธีการบ่มของตัวอย่างคอนกรีต

สำหรับผลกระทบจากวิธีการบ่มตัวอย่างคอนกรีต 2 แบบ คือ บ่มอากาศ 28 วันและบ่มน้ำ 28 วัน ที่คอนกรีต เฝียกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระยะเวลา 28 วัน และ 56 วัน (รูปที่ 7) พบว่า ทุกสัดส่วนผสมคอนกรีต ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วัน มีค่าน้อยกว่าของการบ่มอากาศ 28 วัน ทั้งนี้เป็นเพราะตัวอย่าง

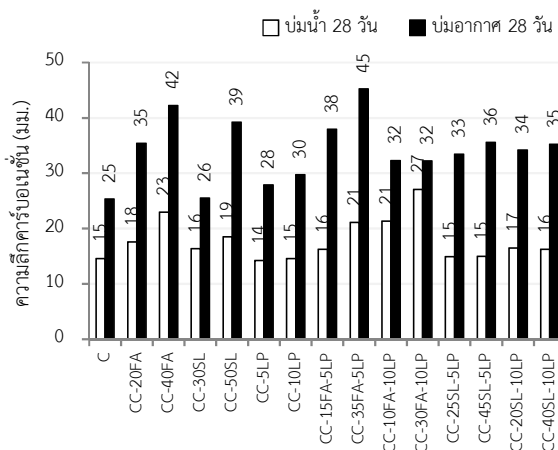
คอนกรีตที่บ่มอากาศ การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือปฏิกิริยา ปอซโซลานไม่สมบูรณ์เท่ากับบ่มน้ำ จึงทำให้การที่บ่มน้ำของตัวอย่างคอนกรีตน้อยกว่าของที่บ่มน้ำ 28 วัน [7,8] ส่งผลทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น

### 3.3.3 ผลกระทบของระยะเวลาของตัวอย่างคอนกรีตที่เฝียกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ผลการศึกษาผลกระทบจากเวลาที่เฝียกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะเร่งของตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอย ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผสมผงหินปูน (รูปที่ 8) จากการศึกษาพบว่า คอนกรีตทั้งที่บ่มน้ำ 28 วัน และบ่มอากาศ 28 วัน ที่เฝียกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะเร่งด้วยตู้อบคาร์บอนเนชั่น (28 วันและ 56 วัน) นั้น ระยะเวลาที่ตัวอย่างคอนกรีตเฝียกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นานกว่า ส่งผลให้ความลึกคาร์บอนเนชั่นมากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เพราะระยะเวลาในการเฝียกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นานขึ้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็สามารถเข้าสู่ตัวอย่างได้มากขึ้น ส่งผลให้ตัวอย่างคอนกรีตมีความลึกคาร์บอนเนชั่นมากขึ้น

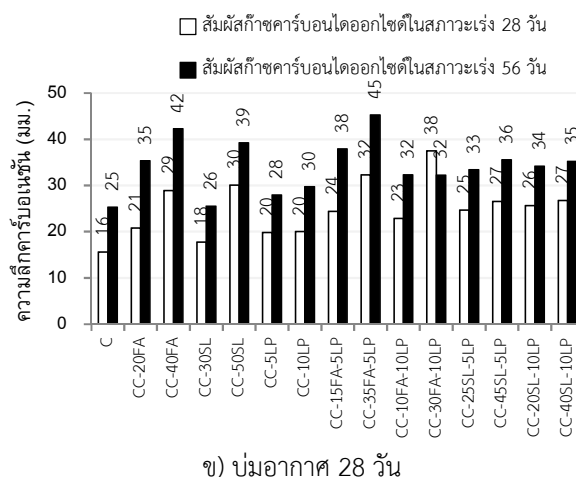
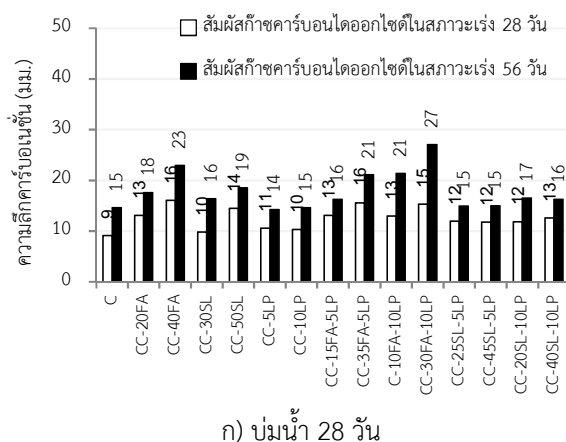


ก) เฝียกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน



ข) เฝียกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 56 วัน

รูปที่ 7 ความลึกการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วัน และบ่มอากาศ 28 วัน



รูปที่ 8 ความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 และ 56 วัน

โดยการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปเปรียบเทียบผล การศึกษาสมบัติพื้นฐานและการเกิดคาร์บอนชั้นระหว่าง ของเพสต์/คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ด้วยวัสดุประสานต่างชนิดกัน (ปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก่ลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียด และผงหินปูน) กับของเพสต์/คอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สรุปเปรียบเทียบสมบัติพื้นฐานและความลึกคาร์บอนชั้นระหว่างของเพสต์/คอนกรีตผสมแก่ลอย ตะกรันเตา ถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน กับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

| รายการ                       | กรณีใช้ 2 วัสดุประสาน |                 |                 | กรณีใช้ 3 วัสดุประสาน |                 |
|------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
|                              | FA                    | SL              | LP              | FA+LP                 | SL+LP           |
| ความต้องการน้ำของเพสต์       | น้อยกว่า              | มากกว่า         | มากกว่า         | น้อยกว่า              | มากกว่า         |
| ระยะเวลาก่อตัวของเพสต์       | ช้ากว่า               | ช้ากว่า         | เร็วกว่า        | ช้ากว่า               | ช้ากว่า         |
| ค่าการยุบตัวของคอนกรีต       | มากกว่า               | น้อยกว่า        | น้อยกว่า        | มากกว่า               | น้อยกว่า        |
| กำลังอัดประลัยของคอนกรีต     | น้อยกว่า              | แนวโน้มน้อยกว่า | แนวโน้มน้อยกว่า | น้อยกว่า              | แนวโน้มน้อยกว่า |
| ความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีต | มากกว่า               | มากกว่า         | แนวโน้มน้อยกว่า | มากกว่า               | แนวโน้มน้อยกว่า |

#### 4. สรุปผล

จากผลการศึกษาครั้งนี้ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) ความต้องการน้ำของเพสต์ผสมแก่ลอย มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ล้วน ในขณะที่ของเพสต์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียดและของเพสต์ผงหินปูนมีค่ามากกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

2) ระยะการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอย และของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่ของเพสต์ผสมผงหินปูนมีค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

3) ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และของผงหินปูนมีค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

4) กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมผงหินปูน มีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5) ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าไม่มากเมื่อเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

6) ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่บ่มน้ำมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตที่บ่มอากาศ

7) ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระยะเวลานานกว่ามีความลึกคาร์บอนเนชั่นมากกว่าของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้อยกว่า

8) สามารถสรุปเปรียบเทียบผลการศึกษาสมบัติพื้นฐานและความลึกคาร์บอนเนชั่นระหว่างคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน กับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนได้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ปิติศานต์ กร้ามาตร และสมนึก ตั้งเดิมสิริกุล, “การต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ผงหินปูน,” การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 3, ชลบุรี, pp. MAT89-96, ตุลาคม 2550.
- [2] S. K. Roy, K. B. Poh and D. O. Northwood, “Durability of concrete accelerated carbonation and weathering studies,” Building. Env., vol. 34, pp. 597-606, August 1998.
- [3] J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul, and T. Leelawat, “A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete,” Construc. Building Mater., vol. 20, pp. 744-753, January 2006.
- [4] C. D. Atis, “Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash,” Construc. Building Mater., vol. 17, pp. 47-152, October 2003.
- [5] N. I. Fattuhi, “Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period,” Materiaux et Constructions, vol. 19, no.110, pp. 131-136, 1986.
- [6] กฤษฎา เสือเอี่ยม และณัฐ มากุล, “อิทธิพลของฝุ่นหินปูนต่อสมบัติของซีเมนต์เพสต์ชนิดไหลตัวได้ผสมเถ้ากลบ,” วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 23, ฉบับที่ 3, หน้า 65-73, 2555.

- [7] ปิยะพงศ์ กี่สวัสดิ์คอน, รัฐศักดิ์ พรหมมาศ และ ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล, “อัตราการใช้ผงซีเมนต์ในคอนกรีตผสมเถ้าทลายปาล์มน้ำมันและหินฝุ่นแทนทรายที่บ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ,” รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์, 2558.
- [8] อภิชาติ คำภาหล้า, โกสิทธิ์ เทียมลม และจิระยุทธ สืบสุข, “อิทธิพลของวิธีการบ่มต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต,”วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, หน้า 87-96, 2557.
- [9] Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air- Permeability Apparatus, ASTM C 204 – 00, 2000.
- [10] Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, ASTM C 188 – 95, 1995.
- [11] Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste, ASTM C 187 – 11, 2011.
- [12] Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, ASTM C 191 – 13, 2013.
- [13] Standard Test Method for Slump of Hydraulic- Cement Concrete, ASTM C 143/C 143M – 98, 1998.
- [14] Method of Making Test Cube from Fresh Concrete, British Standard Institute, BS 1881: Part 108, 1983.
- [15] Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)1, ASTM C 109 – 07, 2007.
- [16] Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete, ASTM C 856 – 04, 2004.