



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ทุนวิจัยหมวดเงินอุดหนุน (ว.1)

ประจำปีงบประมาณ 2560

เรื่อง ผลของการบ่มด้วยไมโครเวฟต่อสมบัติของซีเมนต์เพสต์

จากของเสียอุตสาหกรรม

Effect of microwave curing on properties cement past from  
industrial wastes

คณะผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล      ผศ.ดร. รุ่งโรจน์ ปิยะภาณุวัฒน์      หัวหน้าโครงการ  
สังกัด      มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (ราชบุรี)

เดือน มกราคม พ.ศ.2561

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการบ่มด้วยไมโครเวฟต่อการพัฒนากำลังอัด และความทนทานต่อการกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟตของซีเมนต์เพสต์จากของเสียอุตสาหกรรม โดยมีการเตรียมซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับตะกอนดินประปา กากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินบิทูมินัส และกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเศษเซรามิก (บิสกิต) และทำการทดสอบกำลังอัด จากนั้นทำการเลือกอัตราส่วนที่มีค่ากำลังอัดสูงสุดมาทำการศึกษาผลของการบ่มด้วยไมโครเวฟ ที่ 100 200 และ 300 วัตต์ เป็นเวลา 5 10 และ 15 นาที จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัด ความทนทานต่อการกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟตของ และโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับตะกอนดินประปา กากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินบิทูมินัส และกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเศษเซรามิก คือ 60:40, 60:40 และ 70:30 โดยน้ำหนัก และเมื่อ นำมาทำการบ่มด้วยเครื่องไมโครเวฟ พบว่า การบ่มด้วยเครื่องไมโครเวฟสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาของซีเมนต์เพสต์ได้ สภาวะในการบ่มที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดคือ สภาวะในการบ่มไมโครเวฟที่กำลัง 300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที สำหรับอัตราส่วนที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ของทั้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับตะกอนดินประปา และกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเศษเซรามิก (บิสกิต) ส่วนการบ่มไมโครเวฟที่กำลัง 200 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาทีสำหรับกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินบิทูมินัส ส่วนการทดสอบความทนทานของซีเมนต์เพสต์จากของเสียจากอุตสาหกรรมพบว่า การบ่มด้วยไมโครเวฟสามารถลดการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ทุกตัวอย่าง อัตราส่วนที่มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด คือ ซีเมนต์เพสต์จากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปา และเมื่อมีการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค พบ โครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตในทุกอัตราส่วน และการบ่มด้วยไมโครเวฟจะพบโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตหนาแน่นกว่าการไม่บ่ม

## Abstract

This research studied the effect of microwave curing on compressive strength and durability from sodium sulfate of cement paste from industrial wastes. The calcium carbide residue (CCR) with wastewater treatment residue (WTR), calcium carbide residue with bituminous fly ash (BFA) and calcium carbide residue with biscuit (Bis) were prepared for compressive strength test. After that collect the maximum compressive strength from all samples to study effect of microwave curing at 100 200 and 300 watts for 5 10 and 15 mins. The compressive strength, durability and microstructure using Scanning electron microscope were used to investigated in this research. The result showed that the optimum content of cement paste from industrial wastes were 60:40, 60:40 and 70:30 wt.% for CCR:WTR, CCR:BFA and CCR:Bis, respectively. The microwave curing can activate the reaction of cement pastes. The microwave curing at 300 watts for 5 mins for CCR:WTR, and CCR:Bis and 200 watts for 15 mins for CCR:BFA made the highest strength. The durability of cement pastes from industrial wastes showed that the microwave curing decrease weight loss of all cement pastes. The maximum of weight loss was found in CCR:WTR. In the microstructure part found calcium silicate hydrated and calcium aluminate hydrated in all samples. The microwave curing increase the density of calcium silicate hydrated and calcium aluminate hydrated more than room temperature curing.

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ได้สนับสนุนงบประมาณสำหรับการดำเนินงานวิจัย ซึ่งเป็นทุนวิจัยหมวดเงินอุดหนุนที่ได้รับการจัดสรรจากรัฐ และขอขอบคุณภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และศูนย์บริการทางการศึกษา ราชบุรี มจร.ราชบุรี ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้พื้นที่และเครื่องมือต่างๆ สำหรับการศึกษาวิจัย

คณะผู้วิจัย

15 มกราคม 2561

## สารบัญ

|   | หน้า    |
|---|---------|
| บทคัดย่อ                                    |         |
| กิตติกรรมประกาศ                             |         |
| สารบัญ                                      | ก       |
| สารบัญตาราง                                 | ข       |
| สารบัญรูป                                   | ค       |
| บทนำ  |         |
| ความสำคัญและที่มาของปัญหา                   | 1       |
| วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย            | 1       |
| วิธีการดำเนินการวิจัยโดยสรุป                | 1 – 2   |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                   | 2       |
| ทฤษฎีและ/หรือแนวความคิดที่นำมาใช้ในการวิจัย |         |
| ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง                          | 3 – 8   |
| งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                       | 8 – 9   |
| วิธีการดำเนินการวิจัย                       | 10      |
| อภิปรายผล                                   | 11 - 27 |
| สรุปและข้อเสนอแนะ                           | 28      |
| เอกสารอ้างอิง                               | 29      |
| ภาคผนวก                                     | ง – ต   |

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

หน้า  
11

## สารบัญรูป

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 1 บ่อทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในสภาพที่เปียก  | 3    |
| รูปที่ 2 บริเวณที่ทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในสภาพที่แห้ง   | 4    |
| รูปที่ 3 โครงสร้างผลึกของตะกอนดินประปา   | 12   |
| รูปที่ 4 โครงสร้างผลึกของเถ้าลอยบิทุมินัส  | 12   |
| รูปที่ 5 โครงสร้างผลึกของเซรามิก   | 13   |
| รูปที่ 6 โครงสร้างผลึกของกากแคลเซียมคาร์ไบด์   | 13   |
| รูปที่ 7 กำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปา   | 14   |
| รูปที่ 8 กำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินบิทุมินัส  | 15   |
| รูปที่ 9 กำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิก   | 16   |
| รูปที่ 10 ผลของการบ่มด้วยไมโครเวฟต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปา            | 17   |
| รูปที่ 11 ผลของการบ่มด้วยไมโครเวฟต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินบิทุมินัส     | 18   |
| รูปที่ 12 ผลของการบ่มด้วยไมโครเวฟต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิก                  | 19   |
| รูปที่ 13 การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมของเสียจากอุตสาหกรรม                          | 20   |
| รูปที่ 14 การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมของเสียจากอุตสาหกรรมที่ผ่านการบ่มด้วยไมโครเวฟ | 21   |
| รูปที่ 15 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปาที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง         | 22   |
| รูปที่ 16 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปาที่บ่มด้วยไมโครเวฟ            | 23   |
| รูปที่ 17 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าลอยบิทุมินัสที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง      | 24   |
| รูปที่ 18 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าลอยบิทุมินัสที่บ่มด้วยไมโครเวฟ         | 25   |
| รูปที่ 19 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิกที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง               | 26   |
| รูปที่ 20 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิกที่บ่มด้วยไมโครเวฟ                  | 27   |

## 1. บทนำ (Introduction)

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มี 2 กระบวนการ คือ การบวนการแบบเปียก และแบบแห้ง โดยส่วนใหญ่นิยมใช้กระบวนการผลิตแบบแห้งเนื่องจากประหยัดเชื้อเพลิงที่จะทำให้วัตถุดิบแห้งก่อนการเผา แต่ถึงกระนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สูงถึง 1500 องศาเซลเซียส ซึ่งต้องใช้เชื้อเพลิงเป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ในปริมาณมาก ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีความพยายามในการลด การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง โดยมีการนำวัสดุพอซโซลาน เช่น เถ้าแกลบ เถ้าถ่านหิน ซิลิกาฟุ้ง เป็นต้น มาใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วน

วัสดุพอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีทั้งที่สามารถทำปฏิกิริยาและไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำและก่อตัวได้ การผสมวัสดุพอซโซลานที่มีซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) เป็นองค์ประกอบหลัก ในคอนกรีตจะสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากวัสดุพอซโซลานที่ผสมจะใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ซึ่งมีประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงทำให้ในคอนกรีตจึงสามารถผสมวัสดุพอซโซลานได้ประมาณร้อยละ 20 - 40 โดยน้ำหนัก ซึ่งยังทำให้คอนกรีตยังต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างน้อยร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำปูนขาวมาใช้ผสมกับวัสดุพอซโซลาน เช่น เถ้าแกลบ เถ้าถ่านหิน ซิลิกาฟุ้ง ตะกรันเตาถลุง เป็นต้น แต่การพัฒนา กำลังอัดเป็นไปอย่างช้า และมีค่ากำลังอัดต่ำ ทำให้ต้องมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยการลดขนาด การกระตุ้นด้วยสารเคมี และการกระตุ้นด้วยความร้อน จึงจะสามารถพัฒนากำลังอัดได้อย่างรวดเร็ว และยังเป็นทางเลือกในการใช้ปูนซีเมนต์ แต่การใช้ปูนขาวเป็นแหล่งแคลเซียมนั้น ในกระบวนการผลิตปูนขาวยังต้องมีการนำหินปูน และใช้เชื้อเพลิงในการให้พลังงานความร้อนสูงถึงประมาณ 800 องศาเซลเซียส

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะผลิตซีเมนต์เพสต์จากของเสียจากอุตสาหกรรมโดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เป็นของเสียจากกระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีน เป็นตัวแทนแหล่งวัตถุดิบที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบหลัก และใช้บิสกิตซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมเซรามิก ตะกอนประปาที่เป็นของเหลือจากกระบวนการผลิตน้ำประปา และเถ้าลอยถ่านหินจากถ่านหินบิทูมินัส มาทำการศึกษาผลการบ่มด้วยไมโครเวฟต่อพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์สังเคราะห์

### 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาผลของการบ่มด้วยไมโครเวฟในสถานะต่างๆ ต่อการพัฒนากำลังอัด และความทนทานต่อการกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟตของซีเมนต์เพสต์จากของเสียอุตสาหกรรม

### 1.3 วิธีการดำเนินการวิจัยโดยสรุป

- 3.1 ทำการเตรียมตะกอนประปา, เถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส และบิสกิต โดยนำมาทำการตากแห้ง และบดลด จากนั้นนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF
- 3.2 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อตะกอนประปา, กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อบิสกิต ที่อัตราส่วน 70:30, 60:40 50:50, 40:60 และ 30:70

- 3.3 เลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์มาทำการศึกษาผลของการบ่มด้วยเตาไมโครเวฟ โดยใช้กำลัง 100, 200 300 วัตต์ เป็นเวลา 5 10 และ 15 นาที ต่อการพัฒนากำลังอัด และการทดสอบความทนทานต่อทานต่อการกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟต
- 3.4 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก และโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อตะกอนประปา, กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อถ้ำลอยของถ่านหินบิทูมินัส และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อบิสกิต
- 3.5 การศึกษาความทนทานต่อทานต่อการกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟตของซีเมนต์เพสต์ที่เตรียมจากของเสียอุตสาหกรรม

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 4.1 ได้อัตราส่วนซีเมนต์เพสต์ที่สามารถนำมาใช้แทนคอนกรีตได้ในงานบางประเภทได้ ซึ่งสามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ และเป็นการลดมลพิษ และลดการใช้พลังงานในการผลิตปูนซีเมนต์
- 4.2 ลดปริมาณ และเพิ่มมูลค่าของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตน้ำประปา การใช้ถ้ำถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง และบิสกิตจากอุตสาหกรรมเซรามิก
- 4.3 ทราบถึงเทคนิค และวิธีการผลิตซีเมนต์เพสต์ที่เหมาะสมกับวัตถุดิบแต่ละชนิด เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ในอนาคต



## 2. ทฤษฎีและ/หรือแนวความคิดที่นำมาใช้ในการวิจัย

### 2.1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### วัสดุยึดประสาน

##### กากแคลเซียมคาร์ไบด์

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue, CaC<sub>2</sub>) คือกากที่เหลือจากปฏิกิริยาเคมีจากการผลิตก๊าซอะเซทิลีนซึ่งนำไปใช้ในระบบอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการเชื่อมหรือการตัดโลหะเนื่องจากก๊าซอะเซทิลีนเป็นก๊าซที่ติดไฟ หรืออุตสาหกรรมการเกษตรซึ่งใช้ก๊าซอะเซทิลีนเพื่อให้ความร้อนในการบ่มผลไม้ทำให้การบ่มผลไม้สุกได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตามการผลิตก๊าซอะเซทิลีนจะเหลือกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในรูปของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) สูงถึงร้อยละ 74 โดยน้ำหนัก และความต้องการใช้งานของก๊าซอะเซทิลีนในภาคอุตสาหกรรมจากอดีตจนถึงปัจจุบัน พบว่ามีแนวโน้มของกากแคลเซียมคาร์ไบด์เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก และมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยสถิติในปี พ.ศ. 2541 มีการใช้แคลเซียมคาร์ไบด์รวมทั้งสิ้นประมาณ 15,990 ตัน ส่งผลให้เกิดกากแคลเซียมคาร์ไบด์เหลือทิ้งมากกว่า 18,550 ตัน และประมาณได้ว่าการใช้แคลเซียมคาร์ไบด์เพื่อผลิตก๊าซอะเซทิลีนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 10-15 ต่อปี หากไม่มีการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ ก็จะเป็นปัญหาอย่างยิ่ง โดยปัจจุบันได้นำไปถมที่แทนดิน บางส่วนก็นำไปทิ้งหรือกองไว้เป็นบริเวณกว้างซึ่งส่งกลิ่นไปทั่วบริเวณ และเนื่องจากความเป็นด่างที่สูงมากของกากแคลเซียมคาร์ไบด์จึงทำให้ดินในพื้นที่นั้นมีความเป็นด่างสูงไม่สามารถใช้เป็นพื้นที่เพาะปลูกได้ต่อไป (รูปที่ 1 แสดงบ่อทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่อยู่ในสภาพเปียก ส่วนรูปที่ 2 แสดงบริเวณที่ทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในสภาพที่แห้ง) ซึ่งการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้ให้เกิดประโยชน์มีน้อยมาก และส่วนใหญ่เป็นเพียงในงานวิจัยเท่านั้น ดังนั้นหากมีงานวิจัยที่สามารถพัฒนาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีตได้ ก็จะเป็นแรงผลักดันในการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้ให้เกิดประโยชน์และยังเป็นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง



รูปที่ 1 บ่อทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในสภาพที่เปียก



รูปที่ 2 บริเวณที่ทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในสภาพที่แห้ง

### เถ้าลอย

เถ้าลอยนั้นเกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีอยู่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักถ่านหิน ถ่านหินลิกไนต์เมื่อถูกบดละเอียดและส่งเข้าไปในเตาเผาไหม้ที่มีอากาศเพียงพอ การเผาไหม้จะเกิดได้อย่างสมบูรณ์ ความร้อนในเตาเผาทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุในรูปออกไซด์ของโลหะหลายชนิดที่มีความซับซ้อน เถ้าลอยที่เหลือมีอยู่ 3 ลักษณะ คือ

ประเภทที่ 1 เป็นถ่านก้นเตา (Bottom Ash) มีขนาดใหญ่

ประเภทที่ 2 เป็นเถ้าตะกอน (Slag Ash) ที่หลอมละลายเป็นตะกอนติดตามผนังเตาหรือหม้อน้ำ

ประเภทที่ 3 เป็นเถ้าเม็ดละเอียดที่ลอยไปกับก๊าซร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ออกไปทางปล่องไฟแต่ก่อนที่จะส่งผ่านปล่องไฟ จะถูกเครื่องดักฝุ่นจับแล้วส่งต่อไปยังถังเก็บ เรียกเถ้าประเภทนี้ว่าเถ้าลอย (Fly ash)

สมบัติและลักษณะจำเพาะของเถ้าลอย

1) ความละเอียดของเถ้าลอย เถ้าลอยโดยทั่วไปแล้วจะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ ลักษณะทั่วไปจะเป็นรูปทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึง 150 ไมโครเมตร

2) องค์ประกอบทางเคมี องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอยคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silica,  $\text{SiO}_2$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ (Alumina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ดังแสดงในตารางที่ 2.3 โดยที่อัตราส่วนทั้ง 3 นี้จะแปรตามอุณหภูมิ สภาพแวดล้อมขณะเผา และชนิดของถ่านหินที่ใช้เผา ด้วยเหตุนี้ ASTM C 618-08 จึงได้แยกประเภทของเถ้าลอยไว้ 2 ชนิด คือ และแสดงการแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C 618-08 ดังตารางที่ 2.4

- Class F จะมีปริมาณ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก เกิดจากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) และบิทูมินัส (Bituminous) มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่า ร้อยละ 5 ดังนั้นอาจเรียกเถ้าลอยนี้ว่า Low-Calcium Fly Ash หมายถึงเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสานน้อย หรือแทบจะไม่มี แต่ยังมีคุณสมบัติของวัสดุปอสโซลาน

- Class C จะมีปริมาณ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  ระหว่างร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก เกิดจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) และสับบิทูมินัส (Subbituminous) มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 15-23 ดังนั้นอาจเรียกเถ้าลอยนี้ว่า High-calcium Fly Ash ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสานและปอสโซลานในตัวเอง

## ตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา

ตะกอนดินประปาจากการผลิตน้ำประปาเป็นตะกอนที่เหลือจากขั้นตอนการผลิตน้ำประปาเริ่มจากนำน้ำดิบเข้าสู่โรงผลิตน้ำประปา ผ่านการคัดกรองแรง (Screening) ตะกอนหนักจะตกลงสู่ถังตกตะกอน (Sedimentation tank) ส่วนตกตะกอนแขวนลอยจะตกตะกอนโดยการผสมสารเคมีในกระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) และแปรสภาพตะกอนขนาดเล็กให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเกิดและมีน้ำหนักมากขึ้นในกระบวนการรวมตะกอน (Flocculation) ตะกอนที่มีขนาดใหญ่จะตกลงในถังตกตะกอน จากนั้นน้ำใสจะไหลผ่านระบบกรอง (Filtration) ทำให้น้ำใสสะอาดมากขึ้นและผ่านระบบฆ่าเชื้อโรคโดยการเติมคลอรีนเรียกว่ากระบวนการ Disinfection ส่วนกลิ่นและรสที่น้ำรังเกียจไม่เหมาะสมสำหรับการอุปโภคและบริโภคถูกบำบัดด้วยระบบ Activated carbon ส่วนการเติมปูนขาว (Lime) เพื่อควบคุมความเป็นกรดของน้ำและลดการกัดกร่อนของระบบท่อประปา ระบบการเติมคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อป้องกันการเกิดตะกรันในระบบ

## เซรามิกส์ (Ceramic)

หมายถึง สิ่งที่เกิดจากการนำเอาสารอนินทรีย์ที่เป็นโลหะ ซึ่งได้แก่ สารจำพวกแร่หิน หรือดินที่เกิดอยู่ตามธรรมชาติมาใช้เป็นวัตถุดิบหลัก และผ่านกรรมวิธีการผลิต และสิ่งที่สำคัญจะต้องผ่านกระบวนการความร้อนเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรง หรือผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้ดี ซึ่งผลิตภัณฑ์เซรามิกส์มีอยู่ด้วยกันหลายประเภท

### ประเภทของผลิตภัณฑ์เซรามิกส์

เครื่องปั้นดินเผา (Pottery) ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ เป็นที่รู้จักกันอยู่ทั่วไป เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการนำดินและหินประเภทต่างๆ อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายๆ อย่างนำมาผสมกันแล้วนำไปขึ้นรูป แล้วเผาให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรง ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อดินปั้นพรุนตัวและซึมน้ำได้

ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อดินปั้นไม่พรุนตัว แบ่งออกเป็นเนื้อดินปั้นชนิดสีขาวและสีน้ำตาลอ่อน ไม่โปร่งแสง เนื้อดินปั้นประเภทนี้ คือ ผลิตภัณฑ์สโตนแวร์ (Stoneware) ส่วนเนื้อดินปั้นชนิดสีขาวไม่โปร่งแสง (ผลิตภัณฑ์เนื้อเนียน) และชนิดสีขาวโปร่งแสง

ผลิตภัณฑ์วัสดุทนไฟ (Refractories) ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ มีสมบัติพิเศษ คือ สามารถทนความร้อนได้สูง (สูงกว่า 1,580 องศาเซลเซียส ขึ้นไป) มีความแข็งแรงเป็นฉนวนและต้านทานความร้อน ทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ส่วนใหญ่จึงเป็นผลิตภัณฑ์สำคัญที่ใช้ในการทำเตาเผา ทำเตาหลอมเหล็ก หรือใช้กับยานอวกาศที่ต้องเสียดสีและเกิดความร้อนสูง ผลิตภัณฑ์วัสดุทนไฟนี้ ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมถลุงเหล็กถึงร้อยละ 75 ส่วนอีกร้อยละ 25 ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกและอุตสาหกรรมเคมีอื่นๆ ผลิตภัณฑ์วัสดุทนไฟ

ผลิตภัณฑ์แก้ว (Glass) แก้วจัดเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทเซรามิกส์ตรงที่นำเอาสารอนินทรีย์ชนิดโลหะ ซึ่งได้แก่ ททราย ( $\text{SiO}_2$ ) มาเป็นวัตถุดิบหลักและผ่านกระบวนการผลิตที่ต้องใช้ความร้อนให้เกิดการหลอมเหลวแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงจนอยู่ในสภาพของแข็ง โดยไม่เกิดการตกผลึกในเนื้อแก้วนั้น แก้วมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น แก้วที่ใช้ในชีวิตประจำวันมีหลายอย่างด้วยกัน เช่น โซดา - ไลม์ กลาส (Soda - Lime Glass) ลีด กลาส (Lead Glass) ส่วนใหญ่จะเกี่ยวกับ Soda Glass ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$ ) ใช้ทำแก้วดื่ม น้ำ กระจกแผ่น ขวดน้ำอัดลม เป็นต้น

ผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ (Cement) ซีเมนต์ คือ วัสดุที่เป็นเชื้อประสานที่ใช้มากในการก่อสร้าง เช่น งานคอนกรีต งานปูนหล่อ ปูนก่อ ปูนฉาบ หรืองานปูนปั้น เพราะใช้ได้สะดวกและมีความแข็งแรงหลังจากการแข็งตัว ส่วนประกอบของซีเมนต์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปซึ่งเป็นพอร์ตแลนด์ ซีเมนต์ (Portland Cement) ส่วนประกอบที่สำคัญคือ หินปูน ( $\text{CaCO}_3$ ) ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินาและเหล็กออกไซด์ (Alumina and Ferric Oxide) นำมาบดผสมกัน

แล้วเผาด้วยเตาที่หมุนได้ (Rotary Kline) ที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 – 1,300 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นก็นำมาทำให้เย็นแล้วบดเป็นผงอีกครั้งหนึ่ง ซีเมนต์ที่ใช้มีหลายชนิดด้วยกันแล้วแต่ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของชนิดนั้นๆ

ผลิตภัณฑ์โลหะเคลือบ (Enamel) เซรามิกส์ชนิดนี้ คือ สารที่ใช้เคลือบบนผิวโลหะให้มีความสวยงามและคงทนในการใช้งาน ในสมัยก่อนนิยมใช้โลหะประเภททองคำ เงิน แต่ราคาแพง ปัจจุบันนิยมใช้โลหะประเภททองแดง เหล็ก เหล็กกล้า และอะลูมิเนียมแทน เพราะราคาถูกนำมาทำผลิตภัณฑ์ เช่น เครื่องสุขภัณฑ์โลหะเคลือบ เครื่องใช้ในครัวเรือน เช่น จานโลหะเคลือบ ปิ่นโต ป้ายจราจร ตัวตู้เย็น เป็นต้น

ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ขัดหรือตัด (Abrasive) ผลิตภัณฑ์ชนิดนี้ มีความสำคัญในโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆ มาก เพราะใช้ในงานขัดผิวหรือตัด ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ทำมาจากวัตถุดิบที่มีความแข็งมาก ซึ่งในบางครั้งวัตถุดิบเหล่านี้ก็มีอยู่ตามธรรมชาติ เช่น ทราย อะลูมินา ที่เกิดเป็นผลึก คือ คอรัันดัม (Natural Corundum) และเพชร เป็นต้น หรือวัตถุดิบที่สังเคราะห์ขึ้น เช่น ซิลิกอน คาร์ไบด์ (Silicon Carbide) พิวส์ อะลูมินา (Fused Alumina) และเพชรสังเคราะห์ (Synthetic Diamond) เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic and Electrical Ceramic's) ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ประเภทฉนวนไฟฟ้าที่มีความแข็งแรงเป็นพิเศษทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ เช่น สะพานไฟ (Electrical Insulator) ประเภทไฟแรงต่ำ (Low Tension) ไฟแรงสูง (High Tension)

ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ชนิดพิเศษอื่นๆ (special Ceramic's) ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ชนิดพิเศษนี้มีอยู่ด้วยกันหลายประเภท ซึ่งไม่ได้กล่าวมาข้างต้น เช่น เซรามิกส์ที่ใช้กับยานอวกาศ (Rocket) ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในทางการแพทย์ (Artificial Bone) ได้แก่ กระดูกเทียม ฟันเทียม เป็นต้น

## ปฏิกิริยาของวัสดุปอซโซลาน

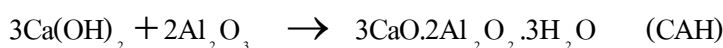
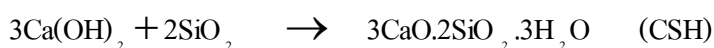
### การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปูนขาวที่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และน้ำเป็นส่วนประกอบ คือผลผลิตส่วนหนึ่งที่ได้จากกระบวนการไฮเดรชัน ซึ่งถูกปล่อยให้เป็นอิสระในระหว่างการก่อตัวของปูนซีเมนต์ ตามทฤษฎีพื้นฐาน ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นเมื่อ สารประกอบซิลิกาในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระเพื่อที่จะเปลี่ยนรูปเป็นสารซีเมนต์ สำหรับปฏิกิริยานี้ซิลิกาต้องอยู่ในรูป ออสซิลาน ถ้าอยู่ในรูปผลึกจะมีผลต่อปฏิกิริยาช้ามาก ดังนั้นอัตราการเพิ่มกำลังรับแรงอัดจึงขึ้นอยู่กับความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับวัสดุปอซโซลาน โดยทั่วไปอัตราส่วนของวัสดุปอซโซลานที่ใช้จะอยู่ระหว่างร้อยละ 15-40 วัสดุปอซโซลานสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ เพื่อทำให้เกิดสารซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน ดังปฏิกิริยาที่เกิดตามสมการข้างล่างนี้

#### ขั้นตอนที่ 1



#### ขั้นตอนที่ 2



จากสมการจะเห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดในขั้นตอนที่ 2 เพราะในขั้นตอนแรกปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้น ดังนั้นจึงคาดการณ์ไว้ว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงแรกๆ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมวัสดุปอซโซลานจะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพราะแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับซิลิกาในวัสดุปอซโซลานแล้วเปลี่ยนรูปไปเป็นสารซีเมนต์ ไม่มีความแตกต่างอย่างเด่นชัดของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์ - ปอซโซลาน ปูนขาว - ปอซโซลาน และสารประกอบซีเมนต์-ปอซโซลาน ภายหลังจากผสมวัสดุปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ปูนขาวกับน้ำ) ของเหลวจะอิมิตัวอย่างรวดเร็วด้วยปูนขาว ค่า pH มากกว่า 12.7 อนุภาคปอซโซลานจะสัมผัสกับน้ำในสภาพที่เป็นต่างสูง จึงทำให้ SiOH (Silica Hydroxyl group) ไปเคลือบอยู่บนอนุภาคปอซโซลานในรูปของ  $\text{SiO}_4^{4-}$  และ  $\text{H}^+$  ในขณะที่  $\text{Ca}^{2+}$  ทำให้ชั้นผิวหนามากขึ้น เพราะฉะนั้นสาเหตุหลักของการเกิดปฏิกิริยา  $\text{Si-O-Si}$  ไฮเดรชันต่อมาเกิดจากการแพร่กระจายของกลุ่มอะตอมผ่านชั้นที่หนาแน่นด้วยผลิตภัณฑ์ไฮเดรตที่เกิดกับวัสดุปอซโซลานกับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

### กระบวนการกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลาน

เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างปูนขาวกับวัสดุปอซโซลานจะเกิดขึ้นช้า ทำให้มีการพัฒนากำลังอัดและการก่อตัวช้า เนื่องจากชั้นที่ผิวหน้าของอนุภาควัสดุปอซโซลานนั้นมีความหนาแน่นสูงและมีความเสถียรภาพทางเคมี โดยชั้นที่ผิวของวัสดุปอซโซลานนี้จะป้องกันไม่ให้สารประกอบในอนุภาควัสดุปอซโซลานที่มีความไวในการทำปฏิกิริยากับวัสดุที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ เหตุผลอีกข้อคือ วัสดุปอซโซลานนั้นมีพันธะ Silica-Alumina ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงเป็นองค์ประกอบ ในการทำปฏิกิริยานั้นจะต้องทำลายพันธะเหล่านั้นก่อน ดังนั้นจึงต้องมีการกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลานในก้อนหล่อแข็ง เพื่อช่วยลดระยะเวลาการก่อตัวและเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดในระยะยาว กระบวนการที่สำคัญที่นำมาใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยามี 3 วิธี ดังต่อไปนี้

### การกระตุ้นด้วยการบดลดขนาด (Mechanical Activation)

เป็นวิธีการที่สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี เนื่องจากความละเอียดของวัสดุทำให้มีพื้นที่ผิวที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาสูง ดังนั้นจึงเพิ่มโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของบูรฉัตรและคณะ [10] ที่ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่องการผลิตซีเมนต์ที่ความไวต่อปฏิกิริยา โดยเตรียมมอร์ต้าผสมซีเมนต์ซีเมนต์ส่วนซีเมนต์ต่อซีเมนต์เท่ากับ 70:30 ทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดที่เวลา 3, 7 และ 28 วัน พบว่าซีเมนต์ที่บดเป็นเวลา 90 นาที จะให้การพัฒนากำลังอัดสูงสุดในทุกอายุการบ่ม

### การกระตุ้นด้วยความร้อน (Thermal Activation)

การบ่มคอนกรีต ในสภาวะที่เหมาะสมหรืออุณหภูมิที่พอเหมาะ สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ได้เช่นกัน การบ่มคอนกรีตมีวิธีการบ่ม 2 วิธีคือ แบบแช่น้ำ และแบบห่อหุ้ม ทั้ง 2 วิธีมีความแตกต่างกันตรงที่การบ่มแบบแช่น้ำเป็นการบ่มเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น แต่ในขณะเดียวกันก็มีการเพิ่มเติมน้ำเข้าไปด้วย ส่วนการบ่มแบบห่อหุ้มเป็นการป้องกันการสูญเสียความชื้นเพียงอย่างเดียว เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการรับแรงอัดพบว่า การกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงสามารถเร่งปฏิกิริยาในช่วงแรกได้ดี แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปความสามารถในการรับแรงจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซีเมนต์ในช่วงแรกให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว การลดลงในช่วงหลังนั้นอาจเกิดจากความร้อนที่บ่มทำให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ไม่คงตัวและสูญเสียความแข็งแรงไป เมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้นความสามารถในการรับแรงอัดในระยะยาว จึงลดลง ผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มคอนกรีตได้

### การกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical Activation)

การกระตุ้นด้วยสารเคมีเป็นวิธีที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานดีขึ้น และมีอัตราการพัฒนากำลังอัดที่เร็วขึ้น ส่วนใหญ่ใช้วิธีการเติมสารเคมีในการกระตุ้น เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ยุ่งยากเหมือนวิธีอื่น และมีค่าใช้จ่ายที่ถูก โดยสารเคมีที่นิยม ได้แก่ สารละลายที่มีฤทธิ์เป็นเบส เนื่องจากสารละลายที่เป็นเบสสามารถกัดกร่อนพันธะ Silica-Alumina โดยสารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) โซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) เป็นต้น ซึ่งสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันและช่วยลดระยะเวลาก่อตัวให้น้อยลง ทำให้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

ปัจจุบันได้มีการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เป็นของเหลือจากกระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีน มาใช้ในงานคอนกรีตกร้อย่างแพร่หลาย โดยส่วนใหญ่จะนำมาใช้ผสมในคอนกรีตเพียงอย่างเดียว หรือผสมร่วมกับวัสดุปอซโซลาน [1-5] เช่น ถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้า ถ้ำกลบ เป็นต้น กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นกากของเสียที่มีปริมาณแคลเซียมประมาณร้อยละ 60- 75 โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถใช้แทนปูนขาว หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากกระบวนการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ได้ ซึ่งถ้านำมาผสมในปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวอาจจะทำให้ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิน ซึ่งทำให้คอนกรีตหรือ ผลิตภัณฑ์ที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณมากจะทำให้การพัฒนา กำลังอัดลดลง เนื่องจากขบวนการที่ขี้เถ้าจะเป็นแหล่งซิลิกา และอะลูมินาที่จะนำมาใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเป็น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งเป็นผลผลิตจากการเกิดปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำ โดยสารทั้งสองชนิดนี้จะมีความสามารถในการยึดประสานได้ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการพัฒนา กำลังอัดอย่างต่อเนื่อง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ได้มีการนำปูนขาวมาผสมกับวัสดุปอซโซลาน ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาที่เหมือนกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเกิดได้จาก 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งคือ เกิดหลังจากกระบวนการปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะเกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน มาทำปฏิกิริยากับวัสดุปอซโซลานเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ส่วนที่สองสามารถเกิดได้จากการนำปูนขาว หรือวัสดุขี้เถ้าที่มีแคลเซียมออกไซด์มาผสมกับวัสดุปอซโซลานโดยตรงก็ได้ แต่การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานนั้นจะเกิดขึ้นอย่างช้ามาก เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีความเป็นด่างสูง โดยจะชะละลายซิลิกา และอะลูมินาจากวัสดุปอซโซลานออกมาทำปฏิกิริยา โดยเฉลี่ยปฏิกิริยาปอซโซลานจะแสดงออกมาอย่างเด่นชัดในช่วงอายุประมาณ 28 วันขึ้นไป จะเห็นได้ว่าการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานนั้นเป็นไปอย่างช้า จึงได้มีการกระตุ้นปฏิกิริยาดังกล่าว ซึ่งมีทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่ การบดลดขนาด การใส่สารกระตุ้นปฏิกิริยาประเภทต่าง หรือการใช้ความร้อนในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งโดยปกติการใช้สารเคมีประเภทต่าง ในการกระตุ้นปฏิกิริยานั้นจะใช้สารจำพวก โซเดียมเป็นหลัก เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซิลิเกต โซเดียมคาร์บอเนต เป็นต้น นอกจากชนิดแล้วปริมาณ หรือความเข้มข้นของสารประเภทต่างที่ใส่ยังมีผลต่อความไวในการเกิดปฏิกิริยาอีกด้วย [6-8] ส่วนการกระตุ้นด้วยความร้อนจะใช้การบ่มในเตาอบ หรือน้ำร้อนในการบ่ม ซึ่งอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการบ่มนาน

ผลผลิตที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเพิ่มสมบัติบางประการให้กับคอนกรีต หรือวัสดุที่นำไปผสมเช่น เพิ่มกำลังอัดในช่วงอายุมากกว่า 28 วัน หรือเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านน้ำ เพิ่มความสามารถในการทนทานต่อการกัดกร่อน เป็นต้น [1-3] ทำให้ในบางครั้งการนำวัสดุที่มีแคลเซียม และวัสดุปอซโซลานไปผสมใน

คอนกรีตจึงต้องมีการบ่มที่ระยะเวลานาน จึงจะเห็นถึงอิทธิพลของปฏิกิริยาดังกล่าว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีแนวทางในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และวัสดุปอซโซลาน เช่น ดินตะกอนประปา, ถ้ำลอยของถ่านหินบิทูมินัส และบิสกิต โดยศึกษาถึงอัตราส่วนที่เหมาะสม และสถานะในการบ่มด้วยไมโครเวฟ โดยทำการศึกษาสมบัติด้านการก่อตัว การพัฒนากำลังอัด และการเปลี่ยนแปลงในระดับจุลภาพ

### 3. วิธีดำเนินการวิจัย (Materials and Method)

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้มี 3 ส่วน ได้แก่ ตะกอนประปาจากโรงผลิตน้ำบางเขน ในเขตกรุงเทพมหานคร, ใ้ล้อยของถ่านหินบิทูมินัสจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี บิสกิต จากบริษัท ภัทราพอลิเมอร์ จำกัด และกากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานผลิตก๊าซอะซิทีลีนโดยนำมาทำการตากแห้ง และบดลดขนาดให้น้ำหนักคง ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกิน ร้อยละ 34 ตามมาตรฐาน ASTM C618 จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF

#### 3.2 การเตรียมตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์ก้อนจีโอพอลิเมอร์ จากตะกอนประปา, ใ้ล้อยของถ่านหินบิทูมินัส และ บิสกิต โดยศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อตะกอนประปา, กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อใ้ล้อยของถ่านหินบิทูมินัส และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อบิสกิต ที่อัตราส่วน 70:30, 60:40 50:50, 40:60 และ 30:70 จากนั้นทำการทดสอบหาความชื้นเหลวปกติ (Normal consistency) โดยใช้เครื่องมือทดสอบไวแคต (Vicat apparatus) และทำการหล่อตัวอย่างลงในแบบหล่อท่อพีวีซีทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร สูง 7 เซนติเมตร (6 ตัวอย่างต่อหนึ่งชุดทดสอบ) ตัวอย่างออกเป็น 2 ชุดคือชุดแรกบ่มที่อุณหภูมิห้องโดยตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 7 14 21 และ 28 วัน จากนั้นเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมของทั้ง 3 อัตราส่วน มาทำการบ่มด้วยเตาไมโครเวฟ โดยใช้กำลัง 100, 200 300 วัตต์ เป็นเวลา 5 10 และ 15 นาที แล้วนำมาห่อพลาสติกทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง

#### 3.3 การทดสอบ

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีตแบบแกนเดี่ยว (Unconfined Compressive Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D1633-00 [9] โดยนำซีเมนต์สังเคราะห์ที่บ่มตามระยะเวลาที่กำหนดแล้วมาทำการทดสอบ จากนั้นนำค่ากำลังอัดที่ได้มาคำนวณหา ค่าเฉลี่ย และนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ และทำการศึกษาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์แต่ละอัตราส่วน เมื่อได้อัตราส่วนที่เหมาะสมก็จะนำไปทำการบ่มด้วยไมโครเวฟ จากนั้นนำมาทำการวิเคราะห์ดูการเปลี่ยนแปลงที่ผิว ด้วยเครื่อง Optical Microscope และวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกด้วย XRD จากนั้นนำมาทำการทดสอบความทนทานต่อทานต่อการกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟต



## 4. อภิปรายผล (Results and Discussion)

### 4.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ในงานวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์มอร์ตาร์ จากตะกอนดินประปา, แก้วลอยของถ่านหินปิทูมินัส และบิสกิต และกากแคลเซียมคาร์ไบด์โดยทำการเก็บวัตถุดิบในช่วงเดือน กันยายน ถึง ตุลาคม 2559 จากโรงงานที่ผลิตของเสียจากอุตสาหกรรม โดยตะกอนดินประปาได้มาจากโรงบิ้อัดตะกอน ของการประปาบางเขน ซึ่งทำการผลิตน้ำประปา แก้วลอยของถ่านหินปิทูมินัสได้มาจากโรงไฟฟ้า BLP จากจังหวัดระยอง ซึ่งเป็นโรงไฟฟ้าถ่านหินที่ใช้ถ่านหินประเภท ซับปิทูมินัสเป็นเชื้อเพลิง บิสกิตได้มาจากบริษัท ภัทราเซรามิค จำกัด(มหาชน) อ.หนองแค จ. สระบุรี และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ได้จากโรงเชื่อมโลหะ จังหวัด กรุงเทพฯ ซึ่งวัตถุดิบทั้งหมดจะนำมาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง XRF ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยทั้งหมดมีองค์ประกอบทางเคมีดังนี้

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

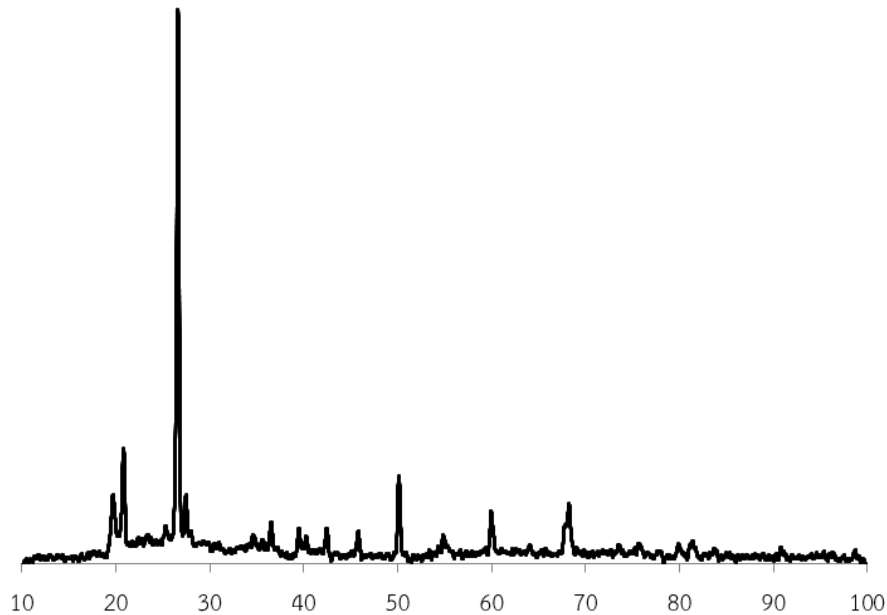
|     | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O |
|-----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-------------------|------------------|
| Bis | 67.90            | 27.92                          | 0.49                           | 0.23  | 0.16 | 0.48              | 2.81             |
| BFA | 60.10            | 28.70                          | 4.70                           | 1.45  | 0.47 | 0.38              | 1.25             |
| WTR | 60.60            | 25.70                          | 7.00                           | 0.92  | 1.12 | 0.35              | 2.20             |
| CCR | 28.53            | 3.58                           | 3.89                           | 59.18 | 3.14 | 0.16              | 1.52             |

บิสกิตเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมเซรามิกที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผา จะนำมาการบดด้วยเครื่อง Los Angeles Aberration เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยมีร้อยละค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำมาทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของบิสกิตเซรามิกด้วยเทคนิค XRF ซึ่งมี SiO<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็นองค์ประกอบหลัก ร้อยละ 67.90 และ 27.92 โดยน้ำหนักแสดงดังตารางที่ 1 อัตราส่วน SiO<sub>2</sub>/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ของบิสกิตมีค่าเท่ากับ 2.43 โดยน้ำหนัก จากตารางที่ 1 แก้วลอยของถ่านหินปิทูมินัสมี SiO<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็นองค์ประกอบหลัก ร้อยละ 60.10 และ 28.7 โดยน้ำหนัก มีอัตราส่วน SiO<sub>2</sub>/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เท่ากับ 2.3 โดยน้ำหนัก และมีแคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 1.45 โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถจัดแก้วลอยของถ่านหินปิทูมินัส เป็นวัสดุพอลิโซลัน Class F ตามข้อกำหนดของ ASTM C618

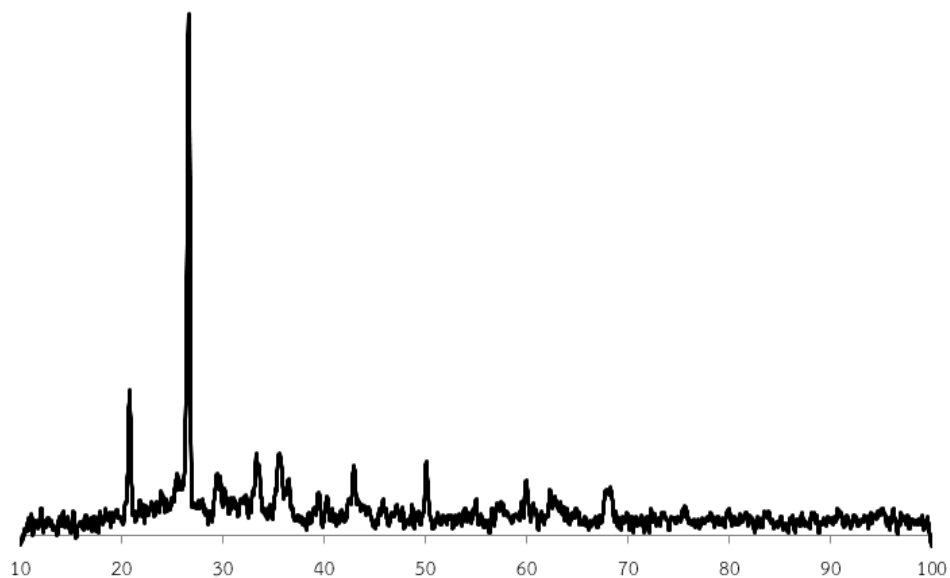
ในงานวิจัยนี้ตะกอนดินประปาของโรงผลิตน้ำบางเขนมีลักษณะเป็นก้อนแข็ง สีน้ำตาลอ่อน หรือสีเทาอ่อนอมน้ำตาลมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ฮีโอพอลิเมอร์ เนื่องด้วยตะกอนดินมีลักษณะคล้ายดินเหนียว ความละเอียดสูง และมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมโดยมี SiO<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็นองค์ประกอบหลัก ร้อยละ 60.60 และ 25.7 โดยน้ำหนัก โดย Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในตะกอนดินมาจากกระบวนการเติมสารส้ม (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.18H<sub>2</sub>O) เพื่อช่วยสร้างตะกอนในกระบวนการตกตะกอนของระบบผลิตน้ำประปาโดยมีอัตราส่วน SiO<sub>2</sub>/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เท่ากับ 2.36 โดยน้ำหนัก โดยตะกอนดินประปาที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะต้องมีเฝ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อทำให้เกิดกระบวนการ dehydroxylation ซึ่งจะทำลายโครงสร้างผลึกกำจัดสารอินทรีย์ และอนินทรีย์

ของตะกอนดินประปา และก่อนการนำมาใช้จะต้องทำการบดลดขนาดอนุภาคให้มีขนาดเล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสในการทำปฏิกิริยา

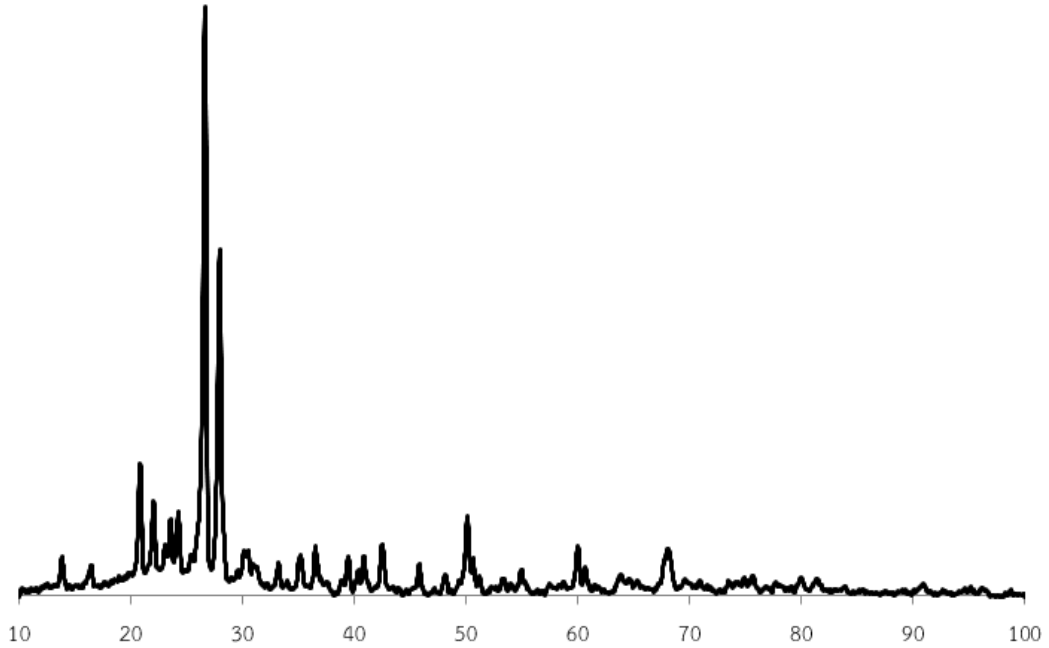
ส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนสีขาวนวล เมื่อทำการอบแห้ง และนำไปบดด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion Machine จากนั้นทำการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งแสดงดังตารางที่ 1 โดยมี  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{CaO}$  เป็นองค์ประกอบหลัก ร้อยละ 28.53 และ 59.17 โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาละลายน้ำ ในอัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อน้ำเท่ากับ 1:120 มีค่า pH เท่ากับ 11.98 ซึ่งมีสมบัติคล้ายกับปูนขาว และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่หลีกเลี่ยงจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับวัสดุพอลิโซลันแล้วเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน และสามารถพัฒนากำลังของมอร์ตาร์ได้



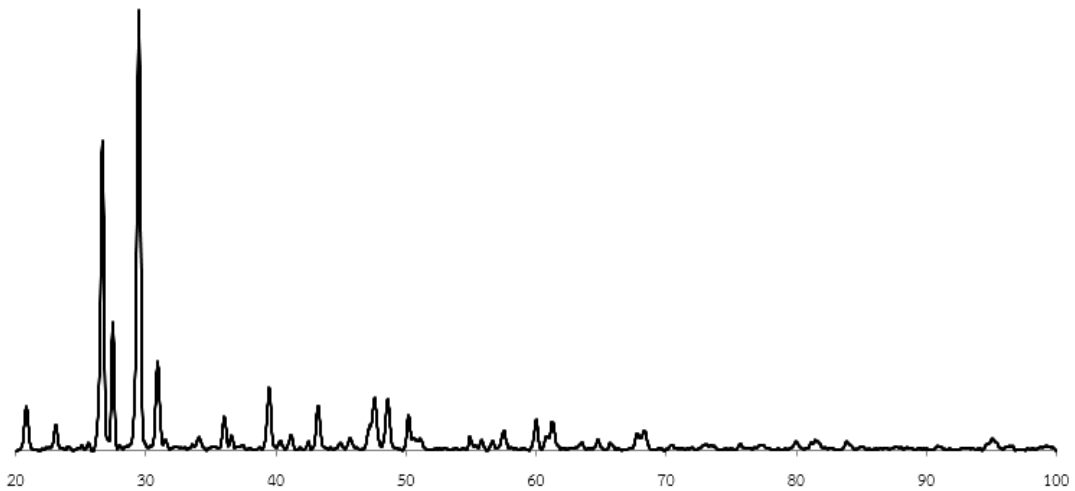
รูปที่ 3 โครงสร้างผลึกของตะกอนดินประปา



รูปที่ 4 โครงสร้างผลึกของเถ้าลอยบิทุมินัส



รูปที่ 5 โครงสร้างผลึกของเซรามิก

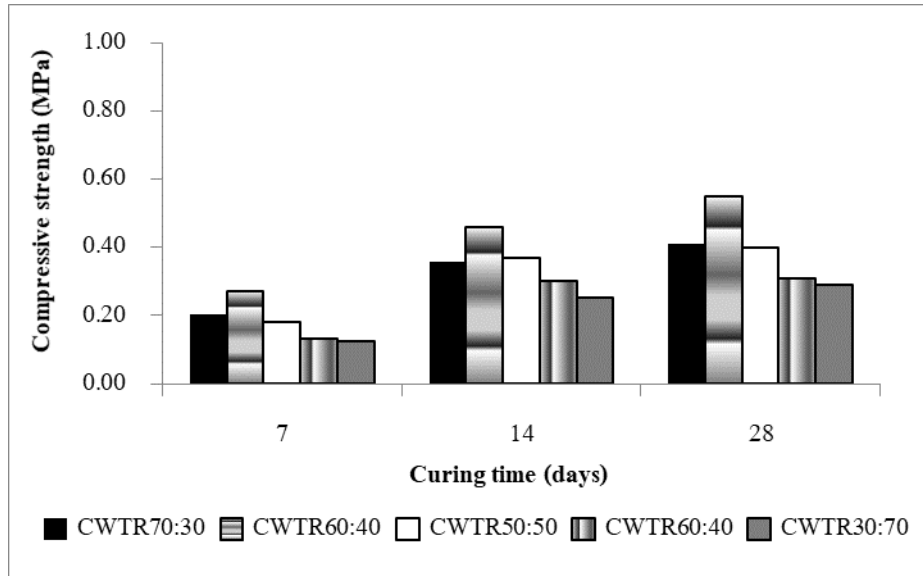


รูปที่ 6 โครงสร้างผลึกของกากแคลเซียมคาร์ไบด์

#### 4.2 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของมอร์ตาร์

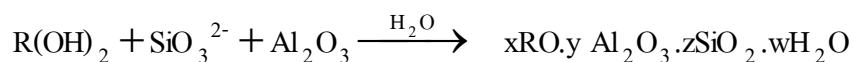
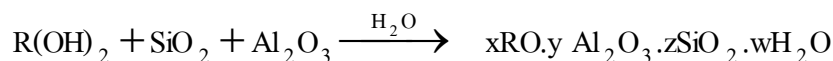
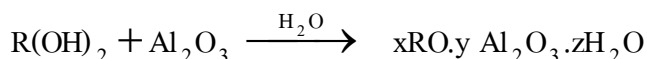
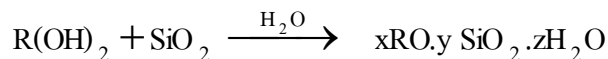
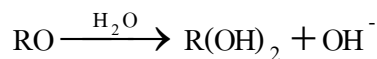
ในงานวิจัยนี้จะทำการเตรียมมอร์ตาร์จากตะกอนประปา, ฝ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส และบิสกิต ผสมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ในอัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อตะกอนประปา, กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อฝ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อบิสกิต เท่ากับ 70:30, 60:40 50:50, 40:60 และ 30:70 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการทดสอบหาความชื้นเหลวปกติ (Normal consistency) โดยใช้เครื่องมือทดสอบไวแคต (Vicat apparatus) และทำการหล่อตัวอย่างลงในแบบหล่อท่อพีวีซีทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร สูง 7 เซนติเมตร (6 ตัวอย่างต่อหนึ่งชุดทดสอบ) จากนั้นนำไปทำการบ่มด้วยการป้องกันการสูญเสียความชื้นด้วยการห่อ

ด้วยพลาสติก เป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน จากนั้นนำมาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด ผลการทดสอบของมอร์ตาร์ ทั้ง 3 ชุด แสดงดังรูปที่ 7 8 และ 9



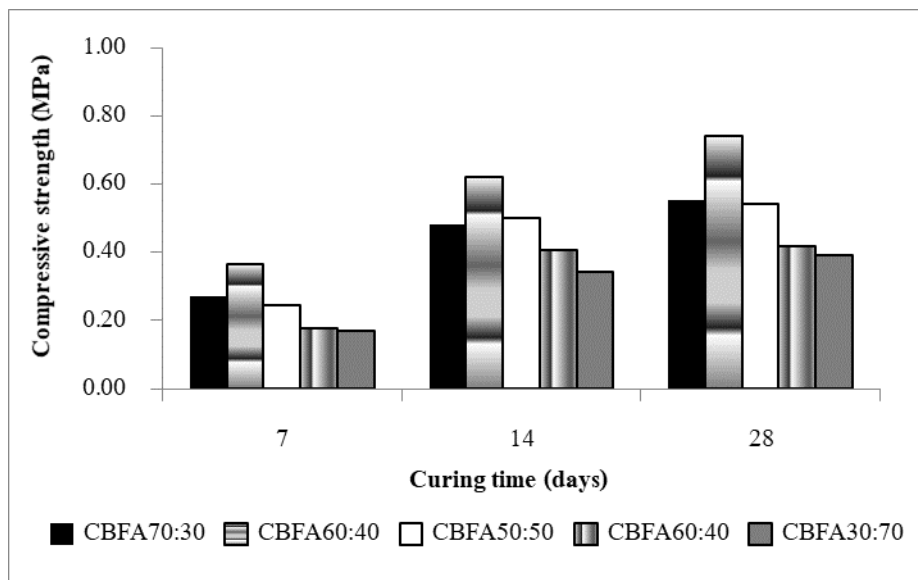
รูปที่ 7 กำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปา

จากรูปที่ 7 แสดงการพัฒนา กำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปาที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 70:30, 60:40 50:50, 40:60 และ 30:70 โดยน้ำหนัก ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ทุกอัตราส่วนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น เมื่อ เนื่องจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์สัมผัสกับน้ำ จะเกิดการละลายของ Calcium Oxide (CaO) ออกมา และจะเพิ่มความเป็นด่างให้กับมอร์ตาร์ เมื่อผสมกับ ตะกอนประปาที่มีมีซิลิกอนไดออกไซด์ (Silica, SiO<sub>2</sub>) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Alumina, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งทำให้เกิดซิลิกาไฮดรอกไซด์ (Si(OH)<sub>4</sub>) และอลูมินา เคลือบอยู่บนผิวของตะกอนดินประปา ทำให้หะ SiO<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่เป็นชั้นบางๆ เคลือบอยู่บนผิวตะกอนดินประปา แล้วไปจับตัวกับ Ca<sup>2+</sup> ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติในการยึดประสานคือ CSH และ CAH gel ซึ่งมีกลไกการเกิดเหมือนกับปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งแสดงดังสมการข้างล่าง สมการการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างปูนขาวกับวัสดุปอซโซลาน แสดงดังสมการข้างล่างนี้



โดยที่ R = แคลเซียมไอออน ( $\text{Ca}^{2+}$ ) หรือ แมกนีเซียมไอออน ( $\text{Mg}^{2+}$ ) หรือไอออนทั้ง 2 ประเภทรวมกัน และ w, x, y, z เป็นตัวแปรที่ขึ้นกับชนิดของ CSH และ CAH ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีสมบัติในการยึดประสาน จะทำให้มีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้น และความสามารถในการรับแรงกำลังอัดจะดีขึ้นด้วย จึงเป็นสาเหตุของการพัฒนา กำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปา

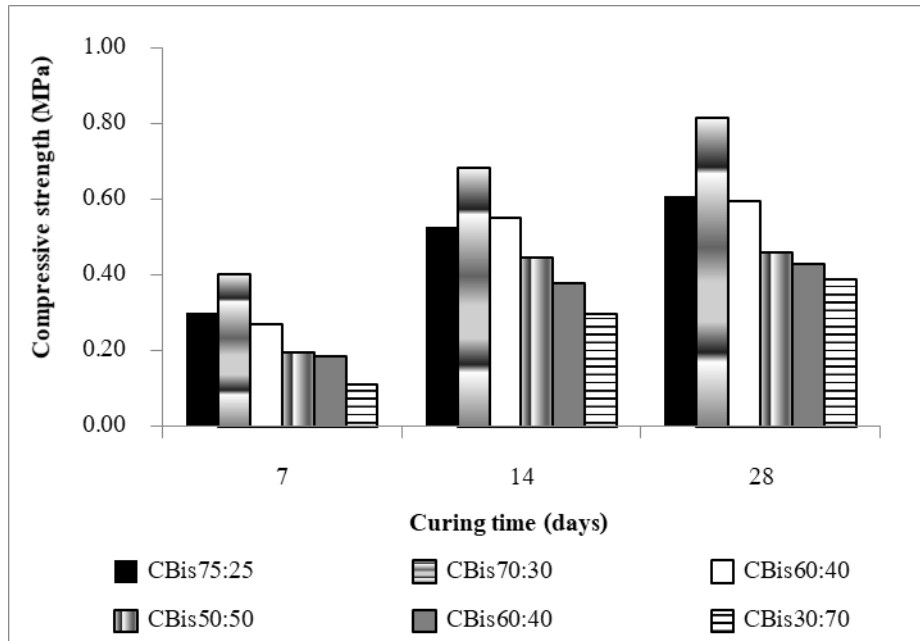
ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปา ที่อัตราส่วน 70:30 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 0.2 MPa และที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 0.41 MPa และมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปามีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 60:40 ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวมีค่ากำลังอัดสูงสุด โดยที่อายุ 28 วันมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 0.55 MPa อาจจะเป็นไปได้ว่า อัตราส่วนมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปาเท่ากับ 60:40 จะเป็นอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมระหว่างปริมาณแคลเซียมออกไซด์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และซิลิกาไดออกไซด์ อลูมินาไดออกไซด์จากตะกอนประปาสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดเป็นสารประกอบที่มีความสามารถในการยึดประสานทั้ง แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตได้ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์เป็น 50:50 40:60 และ 30:70 ค่ากำลังอัดมีค่าลดลง เนื่องมาจากปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น เมื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับตะกอนประปา จะทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมเหลือ ซึ่งเป็นผลทำให้ค่ากำลังอัดลดลง นอกจากนี้ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้นยังทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อปริมาณน้ำมีมากเกินไปเกิดการทำให้ปฏิกิริยา และเมื่อระยะเวลาผ่านไปน้ำเกิดการระเหย เนื่องจากไม่ได้ถูกใช้ในการทำปฏิกิริยา เป็นผลทำให้เกิดรูพรุนภายในโครงสร้างของมอร์ตาร์ เป็นผลให้ความหนาแน่นลดลง และค่ากำลังอัดที่ได้ก็จะมีค่าลดลงไปด้วย



รูปที่ 8 กำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัส

เมื่อทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัส พบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 8 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสที่อัตราส่วน เท่ากับ 70:30 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 0.27 0.48 และ 0.55 MPa ที่อายุเท่ากับ 7 14 และ 28 วัน ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในมอร์ตาร์เป็นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก พบว่า มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.37 0.62 และ 0.74 MPa ที่อายุเท่ากับ 7 14 และ 28 วัน

ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินปิทูมินัสเท่ากับ 60:40 มีค่ากำลังอัดสูงที่สุด ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าถ่านหินปิทูมินัส และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมเป็น 50:50 40:60 และ 30:70 มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าอัตราส่วนอัตราส่วนมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินปิทูมินัสเท่ากับ 60:40



รูปที่ 9 กำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิก

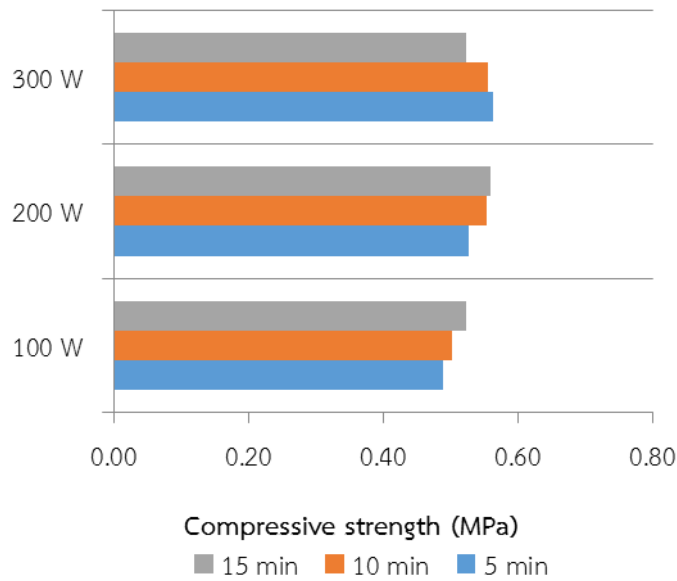
จากรูปที่ 9 แสดงค่าการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิก พบว่าอัตราส่วนที่มีค่ากำลังอัดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 70:30 ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 0.40 0.68 และ 0.82 MPa ที่อายุเท่ากับ 7 14 และ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาผลิตมอร์ตาร์ ที่อัตราส่วนมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิกเท่ากับ 75:25 มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าที่อัตราส่วน 70:30 เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวข้างต้นอาจจะมีปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณน้อย ทำให้ปริมาณแคลเซียมที่จะทำปฏิกิริยากับเซรามิกมีปริมาณน้อย จึงเป็นผลให้ค่ากำลังอัดลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมเป็น 60:40 50:50 40:60 และ 30:70 พบว่า ค่ากำลังอัดมีค่าลดลงจากค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิกที่อัตราส่วน 70:30 โดยที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังอัดลดลง คิดเป็นร้อยละ 27 43 47 และ 53 เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวมีปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นแหล่งที่มาของแคลเซียมออกไซด์ มีปริมาณสูงขึ้น ซึ่งเหลือเกินพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน เป็นผลทำให้ค่ากำลังอัดลดลง ซึ่งมีการพัฒนากำลังอัดคล้ายกับมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปา และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินปิทูมินัส

จากการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปา กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินปิทูมินัส และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิก โดยการทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 14 และ 28 วัน พบว่า อัตราส่วนของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปา และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินปิทูมินัสเท่ากับ 60:40 มีค่ากำลังอัดสูงสุด และมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์

ผสมเซรามิกจะมีค่ากำลังอัดสูงสุดที่อัตราส่วน 70:30 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำอัตราส่วนที่เหมาะสมของแต่ละวัสดุมาใช้ในการศึกษาผลของการบ่มด้วยไมโครเวฟต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์จากของเสียชนิดต่างๆ

#### 4.3 ผลการบ่มด้วยไมโครเวฟต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์

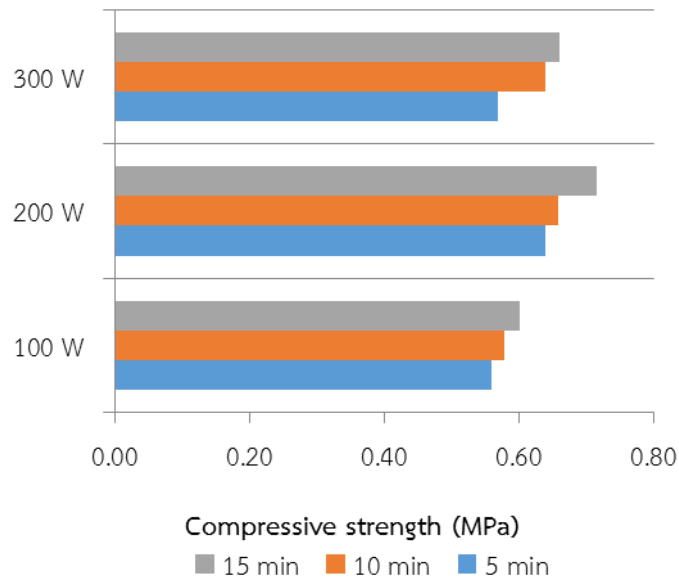
ในการศึกษาผลของการบ่มด้วยไมโครเวฟต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปา กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัส และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิก จะใช้พลังงานในการบ่มที่ 100 200 และ 300 วัตต์ ที่ระยะเวลาในการบ่ม 5 10 และ 15 นาที



**รูปที่ 10** ผลของการบ่มด้วยไมโครเวฟต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปา

การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปาที่มีการบ่มด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 100 200 และ 300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 0.49 0.50 และ 0.52 MPa ซึ่งมีค่ากำลังอัดมากกว่าการบ่มด้วยการป้องกันการสูญเสียน้ำที่อายุ 7 และ 14 วัน พลังงานจากไมโครเวฟสามารถสั่นมวลโมเลกุลของน้ำ ทำให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งจะเกิดการกระตุ้นปฏิกิริยาระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปา ซึ่งเป็นการเร่งการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มไมโครเวฟเป็น 10 นาที พบว่า ค่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น เป็น 0.53 0.55 และ 0.56 MPa สำหรับมอร์ตาร์ที่บ่มด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 100 200 และ 300 วัตต์ตามลำดับ ซึ่งมีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น คิดเป็นร้อยละ 8 10 และ 7.6 และมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 0.56 0.55 และ 0.52 MPa สำหรับมอร์ตาร์ที่บ่มด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 100 200 และ 300 วัตต์ตามลำดับ โดยค่ากำลังอัดสูงสุดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปาที่บ่มด้วยไมโครเวฟที่ 200 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาที และ 300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที ซึ่งทั้งสองอัตราส่วนนี้มีค่ากำลังแตกต่างกันเพียงร้อยละ 0.7 เท่านั้น ซึ่งมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ โดยสภาวะในการบ่มของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปาที่บ่มด้วยไมโครเวฟที่สภาวะ 200 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาที และ 300

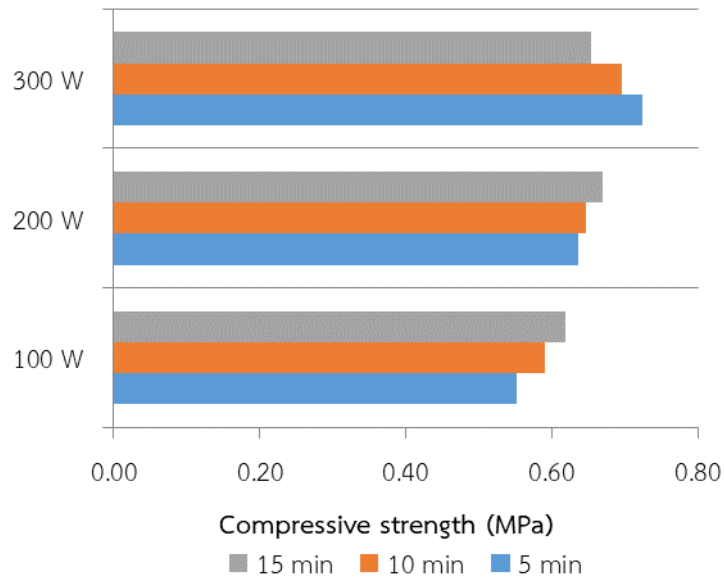
วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที มีค่ากำลังอัดสูงกว่าการบ่มในอากาศที่อายุการบ่ม 28 วัน แสดงให้เห็นว่าการบ่มด้วยไมโครเวฟสามารถลดระยะเวลาในการบ่มมอร์ตาร์ได้



**รูปที่ 11** ผลของการบ่มด้วยไมโครเวฟต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัส

จากรูปที่ 11 แสดงการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสที่มีการบ่มด้วยไมโครเวฟ โดยการบ่มมอร์ตาร์ด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 100 วัตต์ เป็นเวลา 5 10 และ 15 นาที ตามลำดับ มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 0.56 0.58 และ 0.60 MPa ซึ่งมีค่ากำลังอัดมากกว่าการบ่มด้วยการป้องกันการสูญเสียน้ำที่อายุ 7 วัน และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มไมโครเวฟเป็น 200 วัตต์ พบว่า ค่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น เป็น 0.64 0.66 และ 0.72 MPa ที่ระยะเวลาในการบ่ม 5 10 และ 15 นาที ตามลำดับ โดยสถานะในการบ่มมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสที่ 200 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที มีค่ากำลังอัดสูงสุด ซึ่งมีค่าสูงกว่าการบ่มในสถานะปกติที่ 7 และ 14 วัน และเมื่อเพิ่มกำลังวัตต์ในการบ่มเป็น 300 วัตต์ พบว่าค่ากำลังอัดมีค่าเท่ากับ 0.57 0.64 และ 0.66 MPa ที่เวลาเท่ากับ 5 10 และ 15 นาที ตามลำดับ





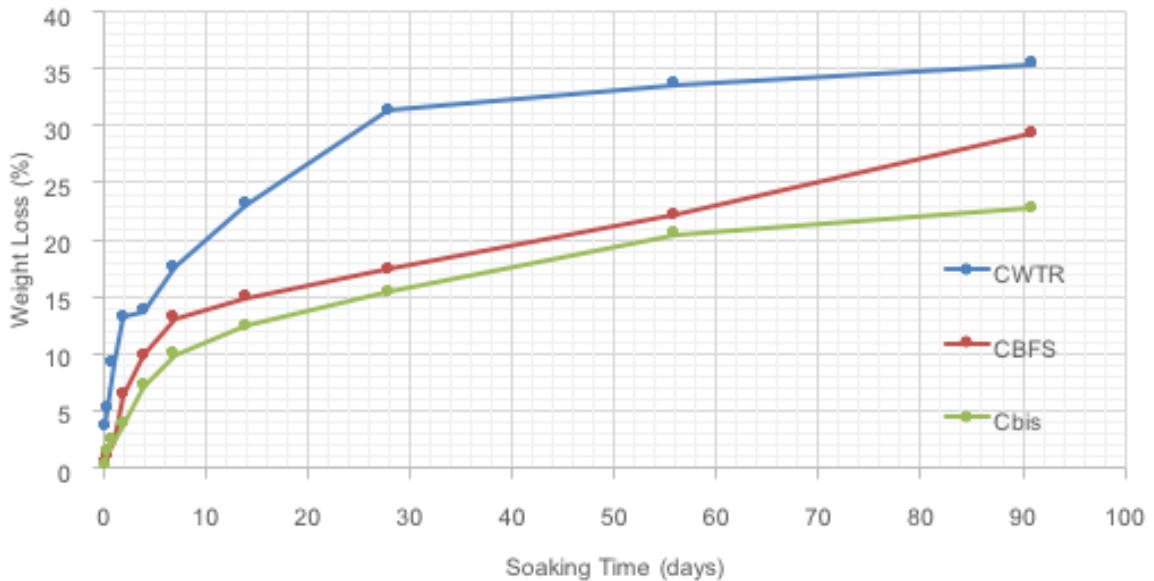
**รูปที่ 12** ผลของการบ่มด้วยไมโครเวฟต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิก

การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิกที่บ่มด้วยไมโครเวฟที่ 100 200 และ 300 วัตต์ ที่ระยะเวลาในการบ่ม 5 10 และ 15 นาที แสดงดังรูปที่ 10 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิกที่บ่มด้วยไมโครเวฟ สามารถพัฒนากำลังอัดได้อย่างรวดเร็ว โดยสามารถใช้แทนมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิกที่บ่มในอากาศปกติที่อายุ 7 วันได้ โดยค่ากำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลา และพลังงานในการบ่มไมโครเวฟในการบ่มเพิ่มขึ้น โดยมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิกที่บ่มด้วยไมโครเวฟที่ 300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที มีค่ากำลังอัดสูงสุด เท่ากับ 0.72 MPa แต่ที่การบ่ม 300 วัตต์ เป็นเวลา 10 และ 15 นาที ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิกมีค่าลดลง ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่า พลังงานของไมโครเวฟที่ 300 วัตต์ ที่ระยะเวลาในการบ่ม มากกว่า 5 นาที อาจจะทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการสั่น และทำให้เกิดความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิสูง ซึ่งอาจจะทำให้ปฏิกิริยาของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเซรามิก ทำปฏิกิริยากันอย่างรวดเร็ว และความร้อนที่สูงอาจจะทำให้น้ำเกิดการระเหยทำให้เกิดรอยแตกร้าวภายในมอร์ตาร์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิก แสดงให้เห็นว่า กำลังวัตต์ และระยะเวลาบ่มที่สูงเกินไปจะทำให้เกิดความร้อนสูง เป็นผลทำให้เกิดรอยร้าวภายในโครงสร้าง และทำให้ค่ากำลังอัดลดลง

จากการศึกษาผลของการบ่มไมโครเวฟต่อการพัฒนามอร์ตาร์กำลังอัดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปา กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินปิทูมินัส และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิก พบว่า ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ทำการบ่มไมโครเวฟที่มีค่ากำลังอัดสูงสุดคือ ซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปาที่บ่มที่ 300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที ส่วนซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินปิทูมินัสที่บ่ม 200 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาที และซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิกที่บ่มที่ 300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที โดยทั้ง 3 อัตราส่วนจะนำมาทำการทดสอบความทนทานต่อโซเดียมซัลเฟตในหัวข้อถัดไป

#### 4.4 การทดสอบความทนทานการกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟต

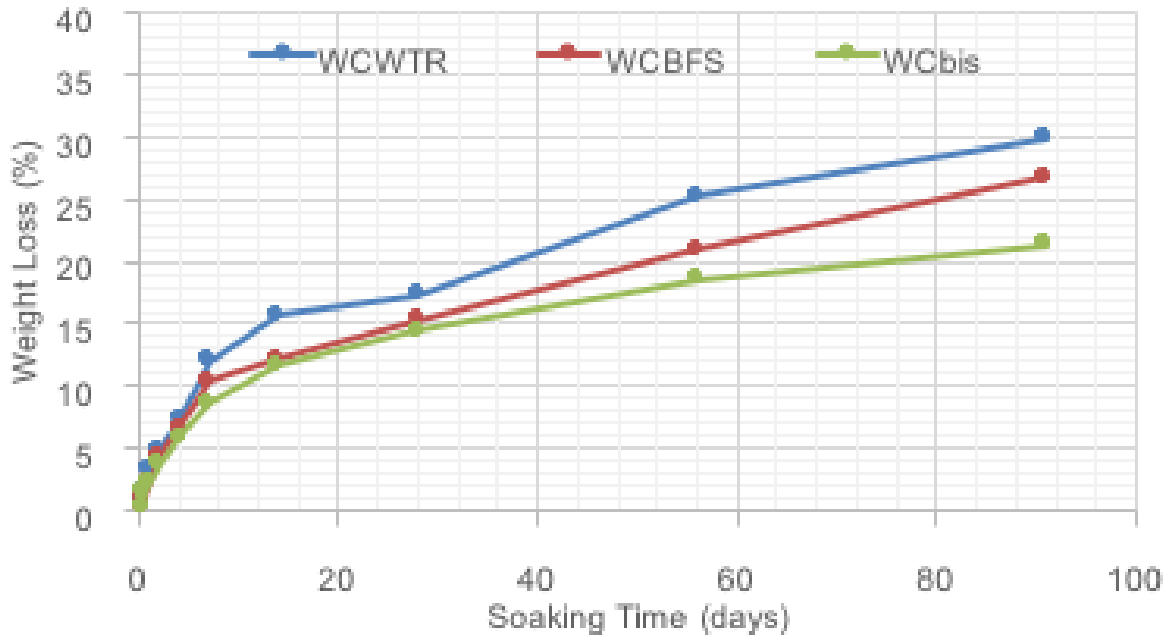
เมื่อนำซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปา แก้วถ่านหินปิทูมินัส และเซรามิก มาทำการทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟต โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ที่มีการบ่มที่อุณหภูมิห้อง และบ่มด้วยไมโครเวฟ (ซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปาที่บ่มที่ 300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที ส่วนซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมแก้วถ่านหินปิทูมินัสที่บ่ม 200 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาที และซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิกที่บ่มที่ 300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที) ซึ่งทำการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียน้ำหนักของก้อนซีเมนต์เพสต์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 13 และ 14



รูปที่ 13 การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมของเสียจากอุตสาหกรรม

จากรูปที่ 11 พบว่า การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ทุกอัตราส่วนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น และซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และตะกอนดินประปามีค่าการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด รองลงมาคือ ซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมแก้วถ่านหินปิทูมินัส และซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิก โดยในช่วง 28 วัน จะมีการสูญเสียน้ำหนักอย่างรวดเร็ว เนื่องจากในช่วงแรกสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะเริ่มแพร่เข้าสู่ภายในช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งจะทำให้อนุภาคขนาดเล็กที่อยู่ในช่องว่างละลายออกมาอย่างรวดเร็ว และเมื่อมีการเปลี่ยนน้ำอย่างต่อเนื่องพบว่า การละลายของซีเมนต์เพสต์เริ่มมีค่าลดลง ซึ่งแสดงได้อย่างชัดเจนในค่าการสูญเสียน้ำหนัก ซึ่งหลังจากระยะเวลาในการแช่ 30 วัน โดยเฉพาะซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และตะกอนดินประปาจะมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ช่วงหลังจาก 30 วัน ส่วนของซีเมนต์เพสต์ที่มีความแข็งแรง(มีการทำปฏิกิริยาสมบูรณ)จะไม่ถูกชะละลายออกมา ซึ่งเมื่อเทียบกับอีก 2 อัตราส่วนพบว่า สอดคล้องกับค่าการพัฒนากำลังอัด ส่วนซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมแก้วถ่านหินปิทูมินัส และซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิกในช่วงต้น และมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สาเหตุมาจากโครงสร้างของตัวอย่างทั้ง 2 ชนิดมีความแข็งแรงในระดับหนึ่ง ซึ่งเมื่อผ่านการแช่ในสารละลาย อาจจะมีบางส่วนที่ผิวชะละลายออกมาบ้าง แต่ยังมีค่าการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และตะกอนดินประปา โดยที่ระยะเวลาในการแช่ 90 วัน มีค่าการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และตะกอนดินประปา, ซีเมนต์เพสต์จากกาก

แคลเซียมคาร์ไบด์ผสมแก้ว่านหินปิทูมินัส และซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิก เท่ากับร้อยละ 35, 29.5 และ 23 โดยน้ำหนัก



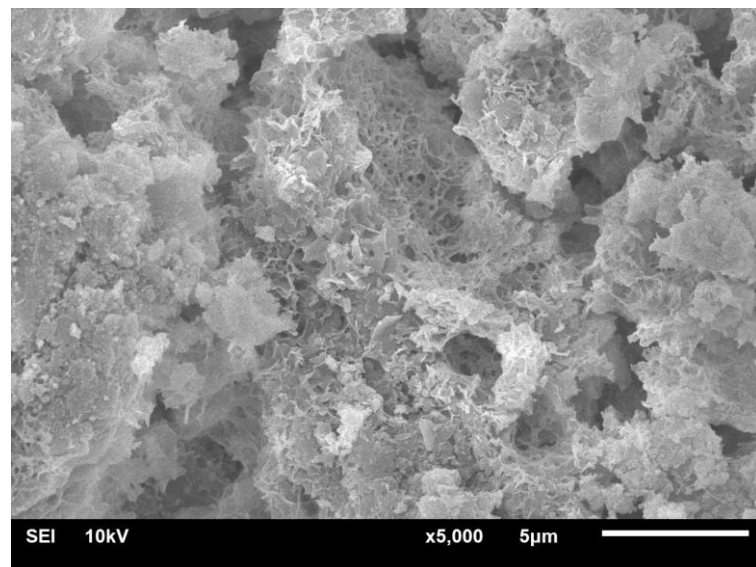
รูปที่ 14 การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมของเสียจากอุตสาหกรรมที่ผ่านการบ่มด้วยไมโครเวฟ

เมื่อมีการบ่มก้อยซีเมนต์เพสต์ด้วยเครื่องไมโครเวฟ ตามสภาวะดังนี้ ซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปาที่บ่มที่ 300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที ส่วนซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมแก้ว่านหินปิทูมินัสที่บ่ม 200 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาที และซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิกที่บ่มที่ 300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที พบว่า ร้อยละค่าการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ทั้ง 3 ชนิด มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ได้ผ่านการบ่มด้วยเครื่องไมโครเวฟ โดยที่ระยะเวลาในการแช่ 90 วัน มีค่าการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และตะกอนดินประปา, ซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมแก้ว่านหินปิทูมินัส และซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิก เท่ากับร้อยละ 30, 27.5 และ 21.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งลดลงคิดเป็นร้อยละ 14.3, 6.7 และ 6.5 การบ่มตัวอย่างด้วยเครื่องไมโครเวฟ สามารถลดการสูญเสีย น้ำหนักได้ลดลงปริมาณร้อยละ 6-15 ซึ่งจากผลการทดสอบสามารถยืนยันได้จากค่ากำลังรับแรงอัด และโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์แต่ละชนิด

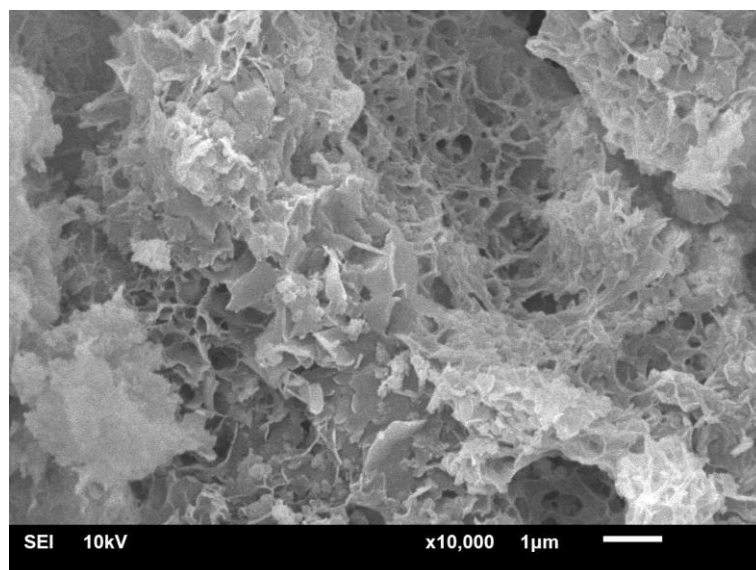
#### 4.5 โครงสร้างระดับจุลภาค

ในการศึกษาโครงสร้างในระดับจุลภาคจะทำการศึกษาเปรียบเทียบซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และตะกอนดินประปา, ซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมแก้ว่านหินปิทูมินัส และซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิก ที่บ่มอุณหภูมิห้อง และซีเมนต์เพสต์ที่บ่มด้วยเครื่องไมโครเวฟ ตามสภาวะดังนี้ ซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปาที่บ่มที่ 300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที ส่วนซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมแก้ว่านหินปิทูมินัสที่บ่ม 200 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาที และซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิกที่บ่มที่ 300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที ผลการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope แสดงดังรูปที่ 15-20

รูปที่ 15 แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และตะกอนดินประปา ที่ปัมที่อุณหภูมิต่ำ พบว่า อนุภาคของซีเมนต์เพสต์มีลักษณะเป็นแผ่นเจล เชื่อมติดกันซึ่งอาจเกิดจากการทำปฏิกิริยาของกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับตะกอนดินประปา ซึ่งอาจเกิดเป็นสารประกอบคล้ายปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งการเกิดแผ่นดังกล่าวมีการกระจายอย่างทั่วทั้งซีเมนต์เพสต์ที่จะมาทำการวิเคราะห์ แสดงเห็นว่า ที่อนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และตะกอนดินประปา และเมื่อมีการบ่มด้วยไมโครเวฟ พบว่า แผ่นเจลที่การกระจายอย่างต่อเนื่องในซีเมนต์เพสต์มีการเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของอนุภาค โครงสร้างมีความแข็งแรง และมีการเชื่อมประสานและอุดรอยต่อของช่องว่างภายในของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และตะกอนดินประปาที่มีการบ่มด้วยไมโครเวฟ จะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งลักษณะโครงสร้างดังกล่าวข้างต้น แสดงในรูปที่ 16

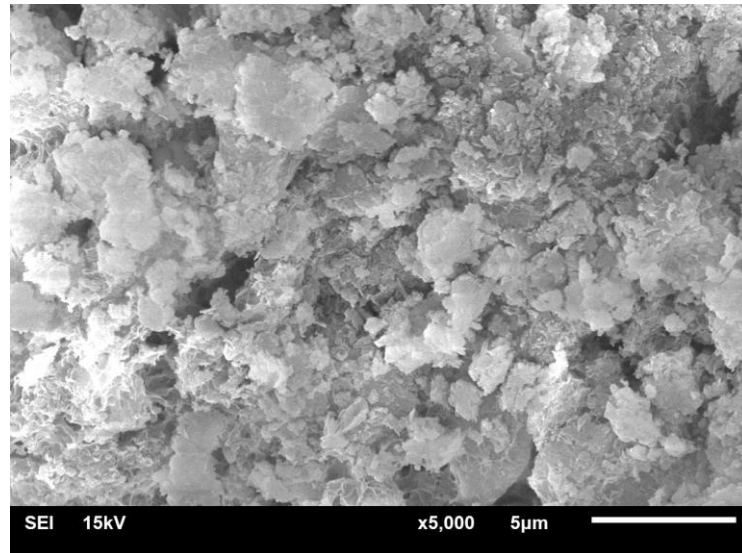


ก) กำลังขยาย 5000 เท่า

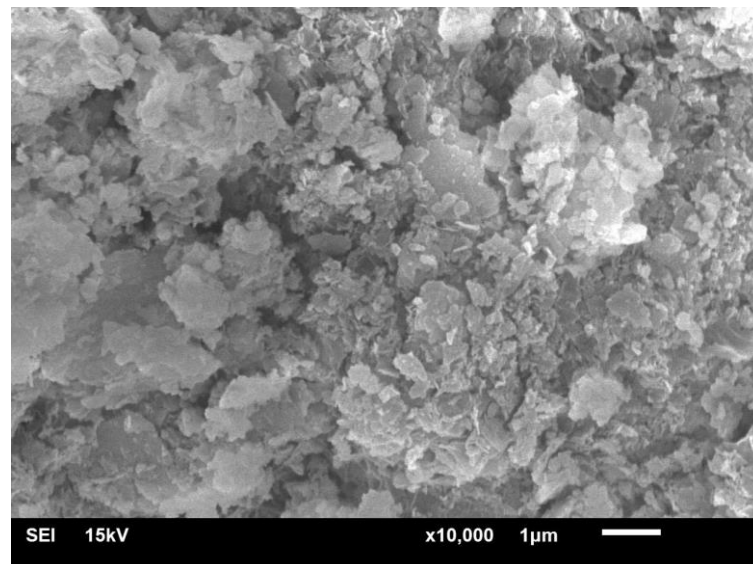


ข) กำลังขยาย 10000 เท่า

รูปที่ 15 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปาที่ปัมที่อุณหภูมิต่ำ



ก) กำลังขยาย 5000 เท่า

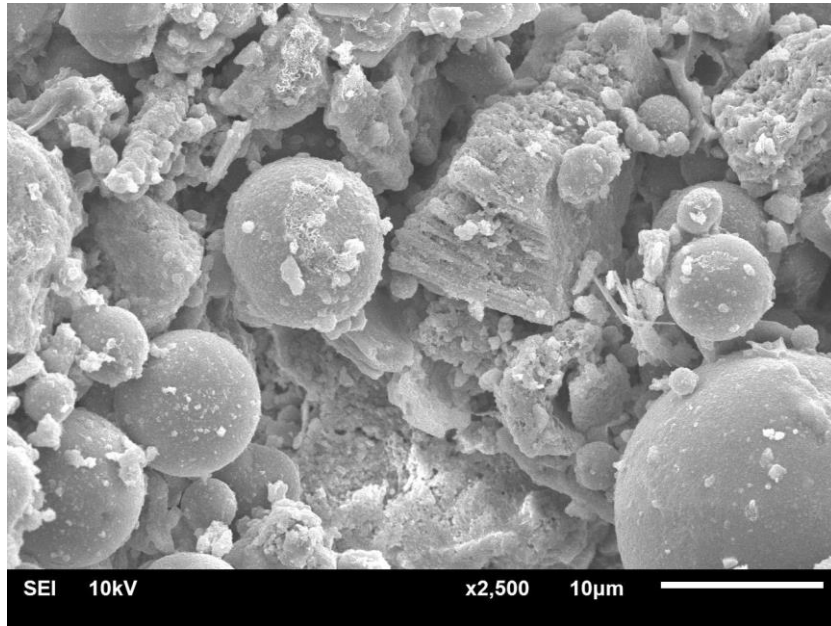


ข) กำลังขยาย 10000 เท่า

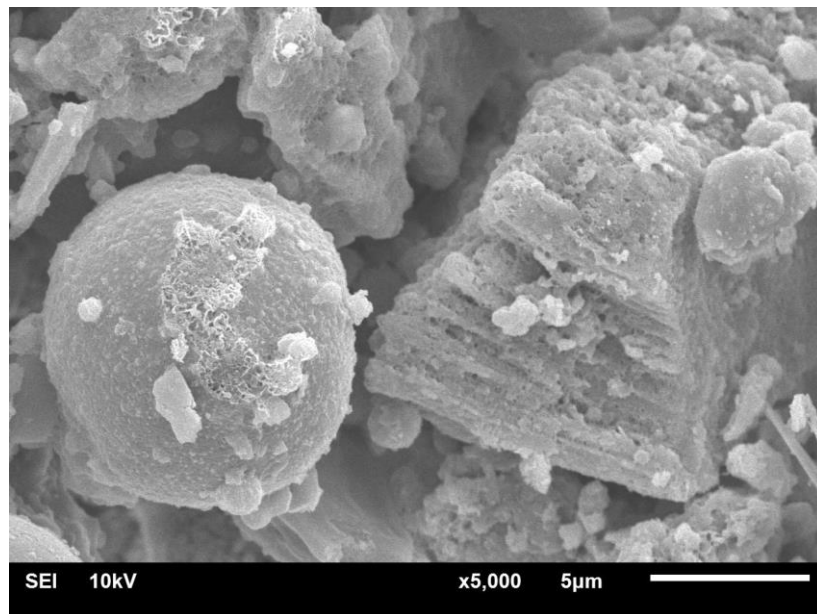
### รูปที่ 16 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปาที่บ่มด้วยไมโครเวฟ

เมื่อนำซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาผสมกับเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส พบว่า มีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างในระดับจุลภาค พบ โครงสร้างระดับจุลภาคที่มีลักษณะกลม ซึ่งเป็นอนุภาคของเถ้าถ่านหินบิทูมินัส และมีอนุภาคที่เป็นก้อนรูปทรงไม่แน่นอน ซึ่งอาจจะเป็นโครงสร้างของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ นอกจากนั้นที่ผิวของอนุภาคที่มีลักษณะกลม และรูปร่างไม่แน่นอน มีอนุภาคที่เป็นลักษณะคล้ายก้อนขาว ซึ่งมีรูปร่างไม่แน่นอนเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน อยู่ที่บนผิวของอนุภาค ซึ่งน่าจะเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าถ่านหิน ซึ่งผลผลิตดังกล่าว น่าจะเป็นโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของอนุภาค ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวเชื่อมประสาน และก่อให้เกิดกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ขึ้น ซึ่งรูปโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์แสดงดังรูปที่ 17

เมื่อมีการบ่มด้วยไมโครเวฟ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 18 พบว่า ผิวของอนุภาคของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสมีเจลของสารประกอบเกาะรอบอนุภาค ซึ่งอาจจะเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดปฏิกิริยาที่ผิวของเถ้าถ่านหินบิทูมินัส เนื่องจากความเป็นต่างของศักย์แคลเซียมคาร์ไบด์ทำให้ซิลิกอน และอะลูมิเนียมจากเถ้าถ่านหินละลายกลับออกมาจากอนุภาค และทำปฏิกิริยากับแคลเซียมจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ละลายอยู่ในของเหลว เกิดเป็นปฏิกิริยาปอซโซลานที่ผิวของเถ้าถ่านหิน และเกิดการตกตะกอนของแคลเซียมซิลิเกต และแคลเซียมอลูมิเนตที่ผิวทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์เพสต์มีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาหลายงานวิจัย ที่กล่าวไว้ว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับวัสดุปอซโซลานเกิดเป็นสารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสานได้ [9]

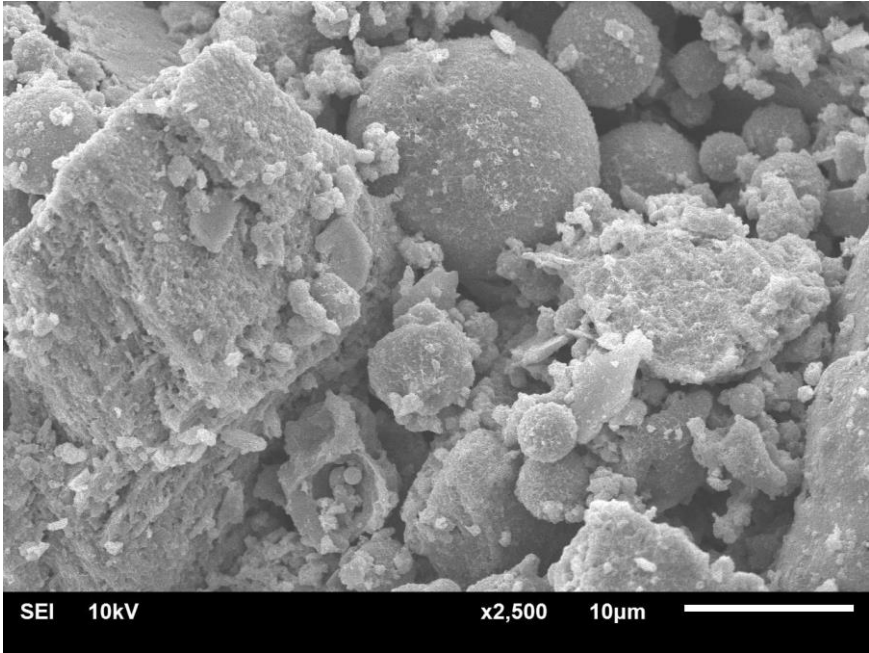


ก) กำลังขยาย 2500 เท่า

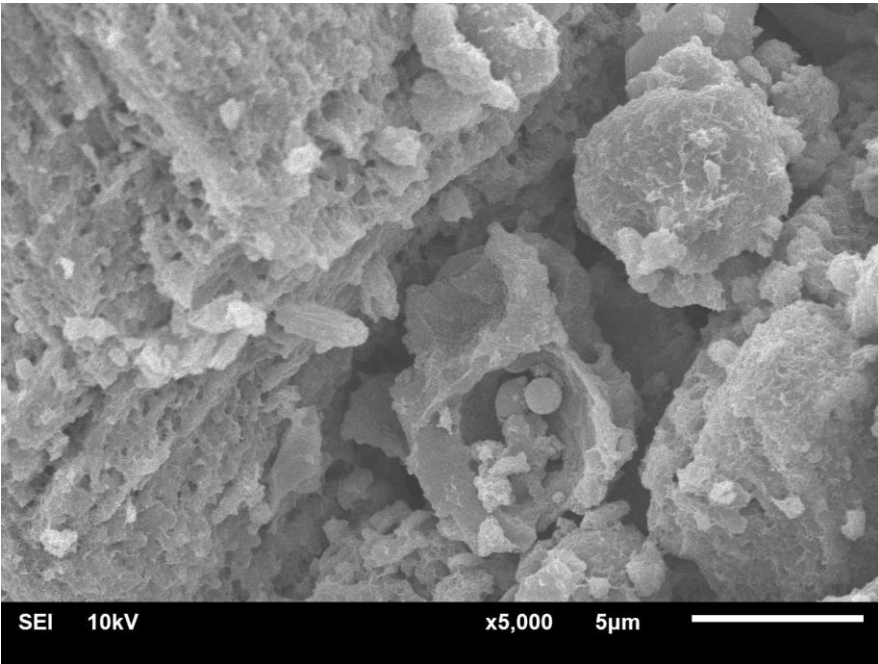


ข) กำลังขยาย 5000 เท่า

รูปที่ 17 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง



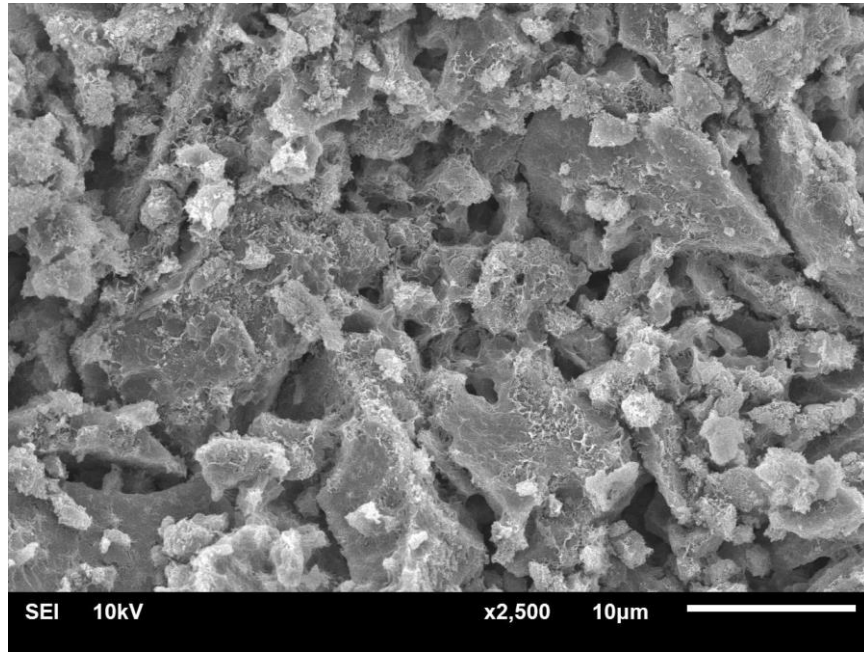
ก) กำลังขยาย 2500 เท่า



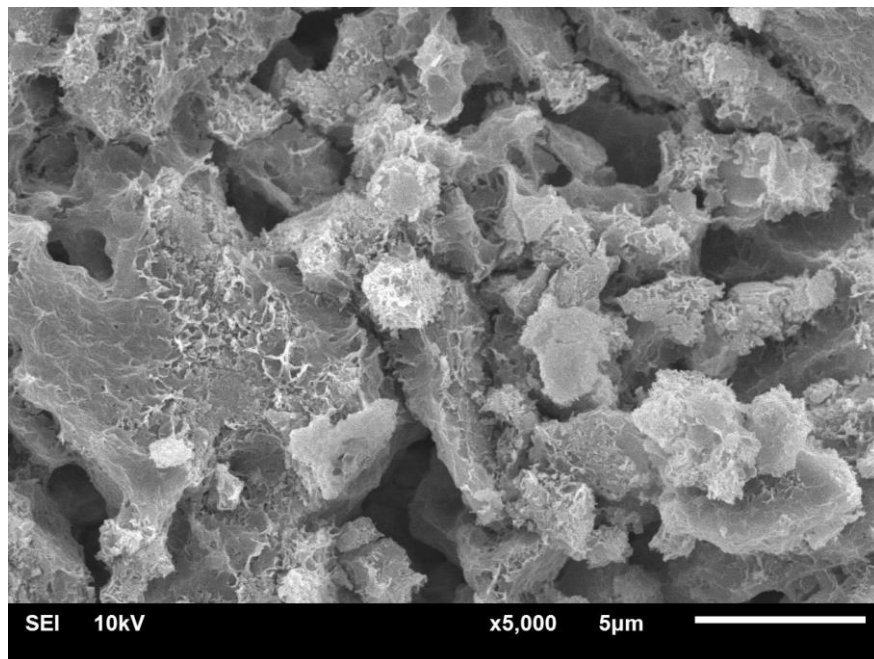
ข) กำลังขยาย 5000 เท่า

รูปที่ 18 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าลอยปิทุมินัสที่บ่มด้วยไมโครเวฟ





ก) กำลังขยาย 2500 เท่า



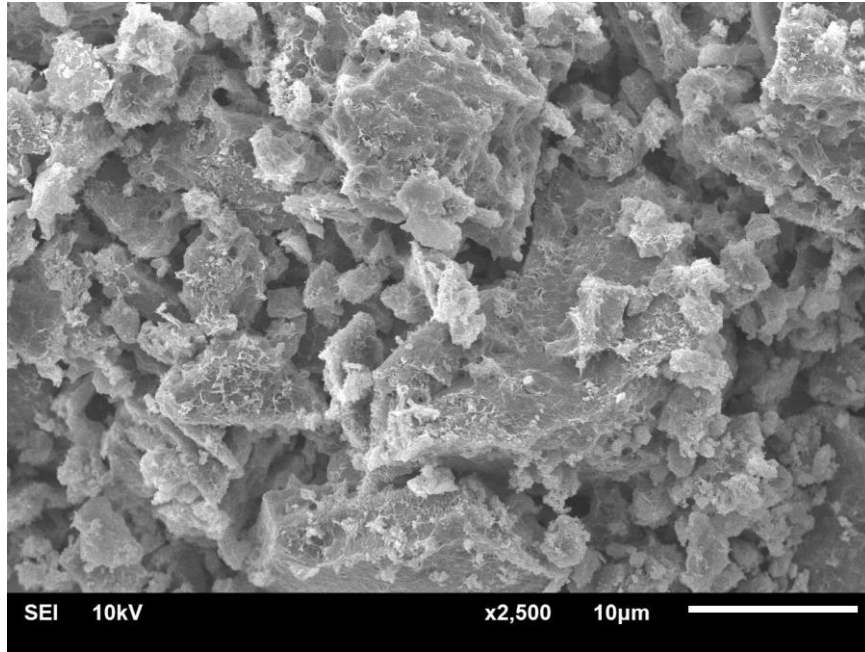
ข) กำลังขยาย 5000 เท่า

**รูปที่ 19** โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิกที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง

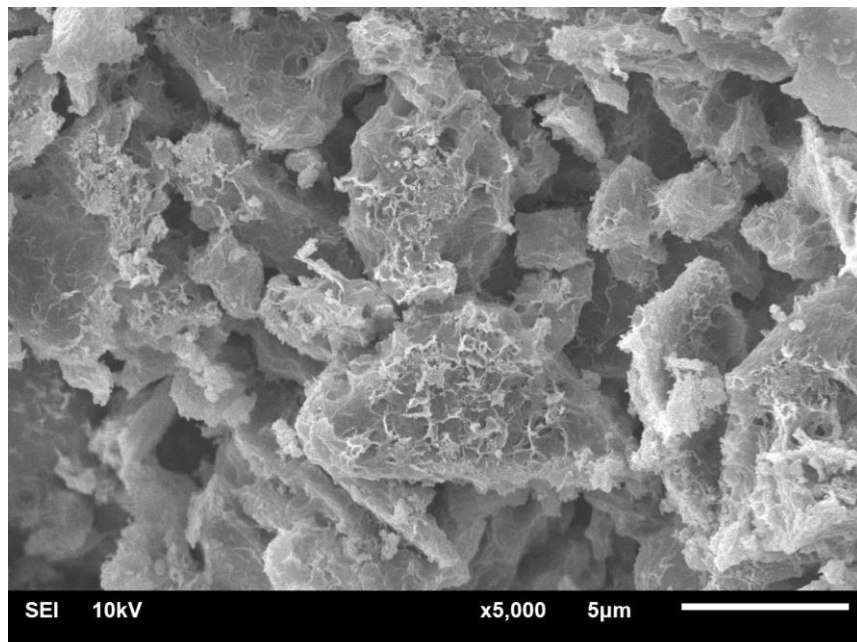
จากรูปที่ 17 แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิกที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง พบว่า อนุภาคของเซรามิกและกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีการทำอนุภาคสีขาวคล้ายเจลเกิดขึ้นรอบอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเซรามิกซึ่งอาจจะเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ กับซิลิกอน และอลูมิเนียมในเซรามิก ทำให้การการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มกึ่งอนตัวอย่างมีปริมาณเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการบ่มซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมและเซรามิกด้วยเครื่องไมโครเวฟ พบว่า โครงสร้างระดับจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงคือ



ปริมาณอนุภาคสีขาว ที่ล้อมรอบกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเซรามิกมีเพิ่มขึ้น อาจจะเป็นตัวบ่งบอว่ามีอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่แสดงว่า การบ่มด้วยไมโครเวฟ จะเพิ่มอัตราการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ได้อีกระดับหนึ่ง



ก) กำลังขยาย 2500 เท่า



ข) กำลังขยาย 5000 เท่า

รูปที่ 20 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิกที่บ่มด้วยไมโครเวฟ

## 5. สรุปและข้อเสนอแนะ (Conclusions and Recommendations)

### 5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาผลของการบ่มด้วยไมโครเวฟในสถานะต่างๆ ต่อการพัฒนากำลังอัด และความทนทานต่อการกัดกร่อนของโซเดียมซิลิเฟตของซีเมนต์เพสต์จากของเสียอุตสาหกรรม พบว่า ในการศึกษาจะต้องมีการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับตะกอนดินประปา กากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินบิทูมินัส และกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเศษเซรามิก (บิสกิต) โดยทำการทดสอบกำลังอัด ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ของทั้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับตะกอนดินประปา กากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินบิทูมินัส และกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเศษเซรามิก (บิสกิต) คือ 60:40, 60:40 และ 70:30 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำมาทำการบ่มด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 100 200 และ 300 วัตต์ เป็นเวลา 5 10 และ 15 นาที ผลการศึกษาพบว่า สภาวะในการบ่มไมโครเวฟที่กำลัง 300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที สำหรับอัตราส่วนที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ของทั้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับตะกอนดินประปา และกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเศษเซรามิก (บิสกิต) ส่วนการบ่มไมโครเวฟที่กำลัง 200 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาทีสำหรับกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินบิทูมินัส มีค่ากำลังอัดสูงสุด และเมื่อนำมาทำการทดสอบการกัดกร่อนด้วยโซเดียมซิลิเฟต ผลการศึกษาพบว่า ค่าการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมตะกอนดินประปา, ซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัส และซีเมนต์เพสต์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเซรามิก เท่ากับร้อยละ 35, 29.5 และ 23 โดยน้ำหนัก ส่วนการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค พบ โครงสร้างระดับจุลภาคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

### 5.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัย

5.2.1 ควรจะมีการศึกษาการพัฒนาโครงสร้างในระดับจุลภาคโดยใช้เครื่องมืออื่นๆ เช่น TGA XRD และเครื่องมืออื่นๆ

5.2.2 ควรมีการนำของเสียจากอุตสาหกรรมอื่นๆมาใช้ผสมทดแทนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ หรือของเสียชนิดอื่นๆ

## 6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] ณัฐพงศ์ มกระจักษ์, 2557, การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานเพื่อทำคอนกรีตที่มีความสามารถในการเทสูง, วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, ปีที่ 10 ฉบับที่ 3 หน้า 106-120.
- [2] Makaratat, N., Laosamathikul, T., Jaturapitukkul, C., 2009, "Utilization of Calcium Carbide Residue-Fly ash Mixture as a Cementing Material in Concrete", The 33<sup>rd</sup> International Association for bridge and structural engineering, IABSE SYMPOSIUM, Bangkok, 96, pp. 144-145
- [3] Jaturapitakul, C. and Roongreung, B., 2003, "Cementing Material from Calcium Carbide Residue-Rice Husk Ash", Journal of materials in Civil Engineering, ASCE, 15 (5), pp. 470-475.
- [4] Makaratat, N., Jaturapitakul, C., Namarak, C., Sata, V., 2011 "Effects of Binder and  $\text{CaCl}_2$  Contents on the Strength of Calcium Carbide Residue-Fly Ash Concrete", Cement and Concrete Composites, 33 (3), pp. 436-443.
- [5] Makaratat, N., Jaturapitakul, C., Laosamathikul, T., 2010 "Effects of Calcium Carbide Residue-Fly Ash Binder on Mechanical Properties of Concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 22 (11), pp. 1164-1170.
- [6] ณัฐรัช ธรรมมาวุฒิ, 2551, ผลของสารกระตุ้นต่อการพัฒนากำลังอัดของก้อนของเสียหล่อแข็งที่ใช้ปูนขาวและปอชโชนเป็นตัวยึดประสาน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [7] Deja, J., 2002, "Immobilization of  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  and  $\text{Pb}^{2+}$  in Alkali-Activated Slag Binders", **Cement and Concrete Research**, No.32, pp. 349-353.
- [8] Krizan, D., and Zivanovic, B., 2002, "Effects of Dosage and Modulus of Water Glass on Early Hydration of Alkali-Slag Cement", Cement and Concrete Research, Vol. 32, pp. 1181-1188.
- [9] Piyaphanuwat, R. and Asavapisit, S., 2011, Performance of lime-BHA solidified plating sludge in the presence of  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  and  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , Journal of Environmental Management, Vol. 92, pp. 2222-2228

ภาคผนวก

| CWTR      |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|
|           | 7     | 14    | 28    |
| CWTR70:30 | 0.202 | 0.356 | 0.410 |
| CWTR60:40 | 0.270 | 0.460 | 0.550 |
| CWTR50:50 | 0.181 | 0.370 | 0.400 |
| CWTR60:40 | 0.132 | 0.300 | 0.310 |
| CWTR30:70 | 0.125 | 0.254 | 0.289 |

| CBFA      |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|
|           | 7     | 14    | 28    |
| CBFA70:30 | 0.273 | 0.481 | 0.554 |
| CBFA60:40 | 0.365 | 0.621 | 0.743 |
| CBFA50:50 | 0.244 | 0.500 | 0.540 |
| CBFA60:40 | 0.178 | 0.405 | 0.419 |
| CBFA30:70 | 0.169 | 0.343 | 0.390 |

| Cbis      |       |       |       |          |
|-----------|-------|-------|-------|----------|
|           | 7     | 14    | 28    |          |
| CBis75:25 | 0.300 | 0.529 | 0.609 |          |
| CBis70:30 | 0.401 | 0.683 | 0.817 |          |
| CBis60:40 | 0.269 | 0.549 | 0.594 | 0.272727 |
| CBis50:50 | 0.196 | 0.446 | 0.460 | 0.436364 |
| CBis60:40 | 0.186 | 0.377 | 0.429 | 0.474545 |
| CBis30:70 | 0.111 | 0.298 | 0.387 | 0.526171 |





















|           | 0.25   |       |       | 0.5    |        |       | 1      |        |       | 2      |        |       |
|-----------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
|           | Before | After | %WL   | Before | After  | %WL   | Before | After  | %WL   | Before | After  | %WL   |
| WCWTR (1) | 125.3  | 124.9 | 0.320 | 124.66 | 122.56 | 1.713 | 122.45 | 118.5  | 3.333 | 124.45 | 118.76 | 4.791 |
| WCWTR (2) | 125.4  | 124.7 | 0.561 | 124.44 | 122.53 | 1.559 | 123.56 | 119.4  | 3.484 | 123.23 | 117.56 | 4.823 |
| WCWTR (3) | 119.6  | 118.9 | 0.589 | 119.6  | 117.87 | 1.468 | 123.68 | 119.89 | 3.161 | 122.44 | 116.76 | 4.865 |
| Avg       |        |       | 0.490 |        |        | 1.580 |        |        | 3.326 |        |        | 4.826 |

|           | 4      |        |       | 7      |        |        | 14     |        |        | 28     |        |        |
|-----------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|           | Before | After  | %WL   | Before | After  | %WL    | Before | After  | %WL    | Before | After  | %WL    |
| WCWTR (1) | 122.26 | 113.91 | 7.330 | 125.86 | 112.13 | 12.245 | 122.32 | 105.85 | 15.560 | 124.45 | 105.76 | 17.672 |
| WCWTR (2) | 121.35 | 112.73 | 7.647 | 126.11 | 111.44 | 13.164 | 123.52 | 106.4  | 16.090 | 126.11 | 107.56 | 17.246 |
| WCWTR (3) | 120.95 | 113.13 | 6.912 | 121.5  | 109.57 | 10.888 | 122.12 | 105.89 | 15.327 | 121.53 | 103.76 | 17.126 |
| Avg       |        |        | 7.296 |        |        | 12.099 |        |        | 15.659 |        |        | 17.348 |

|           | 56     |       |        | 91     |       |        |
|-----------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|
|           | Before | After | %WL    | Before | After | %WL    |
| WCWTR (1) | 121.35 | 99.78 | 21.618 | 119.81 | 91.2  | 31.371 |
| WCWTR (2) | 123.61 | 98.54 | 25.441 | 119.61 | 92.53 | 29.266 |
| WCWTR (3) | 127.52 | 98.89 | 28.951 | 120.43 | 93.34 | 29.023 |
| Avg       |        |       | 25.337 |        |       | 29.887 |

|          | 0.25   |       |       | 0.5    |        |       | 1      |        |       | 2      |        |        |
|----------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
|          | Before | After | %WL   | Before | After  | %WL   | Before | After  | %WL   | Before | After  | %WL    |
| CWTR (1) | 125.3  | 120.9 | 3.639 | 124.66 | 118.56 | 5.145 | 122.45 | 112.5  | 8.844 | 124.45 | 108.76 | 14.426 |
| CWTR (2) | 125.4  | 120.7 | 3.894 | 124.44 | 118.53 | 4.986 | 123.56 | 112.4  | 9.929 | 123.23 | 109.56 | 12.477 |
| CWTR (3) | 119.6  | 115.9 | 3.192 | 119.6  | 113.87 | 5.032 | 123.68 | 113.89 | 8.596 | 122.44 | 108.76 | 12.578 |
| Avg      |        |       | 3.575 |        |        | 5.054 |        |        | 9.123 |        |        | 13.161 |

|          | 4      |        |        | 7      |        |        | 14     |       |        | 28     |       |        |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|
|          | Before | After  | %WL    | Before | After  | %WL    | Before | After | %WL    | Before | After | %WL    |
| CWTR (1) | 122.26 | 106.91 | 14.358 | 125.86 | 106.13 | 18.590 | 122.32 | 99.87 | 22.479 | 124.45 | 95.21 | 30.711 |
| CWTR (2) | 121.35 | 106.73 | 13.698 | 126.11 | 107.44 | 17.377 | 123.52 | 99.89 | 23.656 | 126.11 | 95.65 | 31.845 |
| CWTR (3) | 120.95 | 107.13 | 12.900 | 124.5  | 106.57 | 16.825 | 122.12 | 99.34 | 22.931 | 128.53 | 97.87 | 31.327 |
| Avg      |        |        | 13.652 |        |        | 17.597 |        |       | 23.022 |        |       | 31.295 |

|          | 56     |       |        | 91     |       |        |
|----------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|
|          | Before | After | %WL    | Before | After | %WL    |
| CWTR (1) | 123.35 | 92.2  | 33.785 | 121.81 | 89.2  | 36.558 |
| CWTR (2) | 122.61 | 91.2  | 34.441 | 120.61 | 89.53 | 34.715 |
| CWTR (3) | 126.52 | 95.3  | 32.760 | 123.43 | 91.34 | 35.132 |
| Avg      |        |       | 33.662 |        |       | 35.468 |



|          | 0.25   |        |       | 0.5    |        |       | 1      |        |       | 2      |        |       |
|----------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
|          | Before | After  | %WL   | Before | After  | %WL   | Before | After  | %WL   | Before | After  | %WL   |
| CBFA (1) | 125.12 | 124.86 | 0.208 | 121.36 | 120.06 | 1.083 | 126.11 | 123.5  | 2.113 | 124.45 | 117.16 | 6.222 |
| CBFA (2) | 124.12 | 123.71 | 0.331 | 125.24 | 123.93 | 1.057 | 121.5  | 118.4  | 2.618 | 122.32 | 115.06 | 6.310 |
| CBFA (3) | 129.11 | 128.62 | 0.381 | 120.11 | 118.97 | 0.958 | 123.68 | 120.89 | 2.308 | 123.52 | 116.16 | 6.336 |
| Avg      |        |        | 0.307 |        |        | 1.033 |        |        | 2.346 |        |        | 6.289 |

|          | 4      |        |        | 7      |        |        | 14     |        |        | 28     |        |        |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | Before | After  | %WL    | Before | After  | %WL    | Before | After  | %WL    | Before | After  | %WL    |
| CBFA (1) | 126.11 | 114.91 | 9.747  | 125.86 | 110.13 | 14.283 | 122.32 | 106.05 | 15.342 | 124.45 | 106.06 | 17.339 |
| CBFA (2) | 122.32 | 111.73 | 9.478  | 122.32 | 108.44 | 12.800 | 123.52 | 107.4  | 15.009 | 126.11 | 107.56 | 17.246 |
| CBFA (3) | 123.52 | 112.13 | 10.158 | 123.52 | 110.07 | 12.219 | 122.12 | 106.89 | 14.248 | 121.5  | 103.36 | 17.550 |
| Avg      |        |        | 9.794  |        |        | 13.101 |        |        | 14.866 |        |        | 17.379 |

|          | 56     |        |        | 91     |       |        |
|----------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
|          | Before | After  | %WL    | Before | After | %WL    |
| CBFA (1) | 121.35 | 99.08  | 22.477 | 124.12 | 95.23 | 30.337 |
| CBFA (2) | 120.95 | 99.54  | 21.509 | 122.45 | 95.93 | 27.645 |
| CBFA (3) | 123.56 | 100.89 | 22.470 | 123.56 | 95.11 | 29.913 |
| Avg      |        |        | 22.152 |        |       | 29.298 |

|          | 0.25   |        |       | 0.5    |        |       | 1      |        |       | 2      |        |       |
|----------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
|          | Before | After  | %WL   | Before | After  | %WL   | Before | After  | %WL   | Before | After  | %WL   |
| Cbis (1) | 125.32 | 124.86 | 0.368 | 122.45 | 120.96 | 1.232 | 122.78 | 120.5  | 1.892 | 123.59 | 119.24 | 3.648 |
| Cbis (2) | 124.23 | 123.91 | 0.258 | 125.22 | 122.93 | 1.863 | 121.51 | 118.4  | 2.627 | 121.45 | 117.87 | 3.037 |
| Cbis (2) | 130.11 | 130.02 | 0.069 | 120.36 | 119.07 | 1.083 | 124.68 | 121.59 | 2.541 | 123.51 | 118.33 | 4.378 |
| Avg      |        |        | 0.232 |        |        | 1.393 |        |        | 2.353 |        |        | 3.688 |

|          | 4      |        |       | 7      |        |        | 14     |        |        | 28     |        |        |
|----------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | Before | After  | %WL   | Before | After  | %WL    | Before | After  | %WL    | Before | After  | %WL    |
| Cbis (1) | 123.52 | 115.01 | 7.399 | 125.86 | 114.13 | 10.278 | 122.89 | 108.89 | 12.857 | 123.45 | 107.21 | 15.148 |
| Cbis (2) | 122.12 | 114.9  | 6.284 | 122.32 | 112.04 | 9.175  | 123.11 | 109.88 | 12.040 | 127.11 | 109.96 | 15.597 |
| Cbis (2) | 123.52 | 114.74 | 7.652 | 123.52 | 112.07 | 10.217 | 121.12 | 107.89 | 12.262 | 122.5  | 106.07 | 15.490 |
| Avg      |        |        | 7.112 |        |        | 9.890  |        |        | 12.387 |        |        | 15.411 |

|          | 56     |        |        | 91     |        |        |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | Before | After  | %WL    | Before | After  | %WL    |
| Cbis (1) | 121.35 | 101.08 | 20.053 | 125.12 | 102.23 | 22.391 |
| Cbis (2) | 122.45 | 101.54 | 20.593 | 123.45 | 100.53 | 22.799 |
| Cbis (2) | 123.11 | 101.89 | 20.826 | 125.56 | 102.11 | 22.965 |
| Avg      |        |        | 20.491 |        |        | 22.718 |