

## บทที่ 4

### การดำเนินการวิจัย

การทดลองกระทำที่ห้องปฏิบัติการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งออกเป็นขั้นตอน ดังนี้

#### 4.1 การเตรียมวัตถุดิบและอุปกรณ์

##### 4.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย

- กากตะกอนน้ำมันดิบ  
ในที่นี้หมายถึง กากตะกอนน้ำมันที่ตกตะกอนอยู่กันถึงเก็บกักน้ำมันดิบของ  
โรงกลั่นน้ำมัน บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด

- วัสดุประสาน

ในการวิจัยนี้ใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด คือ

- 1) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง (ตราช้าง)
- 2) ปูนขาวดิบ
- 3) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ผสมกับปูนขาวดิบในอัตราส่วน  
1:1 (โดยน้ำหนัก)

- น้ำประปา

##### 4.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

ในการวิจัยนี้จำแนกเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ตามการทดลอง ดังนี้

- การเผากากตะกอนน้ำมันดิบ

- 1) ภาชนะเซรามิค
- 2) เตาเผาชนิดเชื้อเพลิงแก๊ส

- การทดลองผสมเผาตะกอนกับวัสดุประสาน และการทดสอบกำลังรับแรงอัด

- 1) เครื่องชั่งน้ำหนัก 2,000 กรัม อ่านได้ละเอียดถึง 0.2 กรัม
- 2) แบบหล่อพลาสติกขนาด 5x5x5 เซนติเมตร
- 3) ภาชนะสำหรับผสมซีเมนต์
- 4) แทมเปอร์ (Tamper) มีขนาดหน้าตัด 0.5 นิ้ว x 1 นิ้ว มีความยาว  
ประมาณ 6 นิ้ว ทำด้วยพลาสติก
- 5) เกรียงฉาบซีเมนต์ ความกว้างของใบ 4 นิ้ว
- 6) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

- การทดสอบการชะละลาย
  - 1) ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร
  - 2) ขวดพลาสติกปริมาตร 1 ลิตร ใช้ชนิด Propylene (PP) เพื่อป้องกันการดูดซึมโลหะหนัก
  - 3) ขวดวัดปริมาตร 500 มิลลิลิตร
  - 4) เครื่องซั่งสารเคมี
  - 5) เครื่องเขย่าแนวราบ 200 รอบต่อนาที (Horizontal Shaker)
  - 6) กระจกกรองใยแก้ว ขนาดรู 1 ไมครอน
  - 7) เครื่องวัดพีเอช
  - 8) เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

- การทดสอบความซึมผ่านของน้ำ

ใช้เครื่องทดสอบ Triaxial test ของแผนกปฐพีวิทยา กองปฐพีวิทยา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

## 4.2 การศึกษาวิจัย

งานวิจัยนี้กำหนดแนวทางการศึกษาไว้ดังนี้คือ

### 4.2.1 การทดสอบหาสัดส่วนผสมเบื้องต้น

เป็นการศึกษาเพื่อหาชนิดของวัสดุประสาน และสัดส่วนผสมที่เหมาะสมเบื้องต้นที่สามารถทำให้กากตะกอนน้ำมันดิบหรือซีเถ้าที่ได้จากการเผากากตะกอนน้ำมันดิบแข็งตัวเป็นก้อน โดยการนำกากตะกอนน้ำมันดิบและซีเถ้าที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 400, 800 และ 1,200°ซ มาผสมกับวัสดุประสานชนิดต่างๆ ดังนี้ คือ

- 1) วัสดุประสาน : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง
- 2) วัสดุประสาน : ปูนขาวดิบ
- 3) วัสดุประสาน : ปูนขาวดิบและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง (ใช้อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก)

หลังจากวัสดุประสานจับตัวจนเป็นก้อนแข็ง ทำการบ่มในที่ชื้นเป็นระยะเวลา 28 วัน นำมาทดสอบหาค่ารับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength) และทดสอบโดยวิธีการสกัดสารตามวิธีมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม หาค่า พีเอช, อาร์เซนิก, แคดเมียม, โครเมียม, โปรท และตะกั่ว ในน้ำชะละลาย แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- 1) การผสมกากตะกอนน้ำมันดิบกับวัสดุประสาน คือ
  - ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง โดยใช้อัตราส่วนผสมวัสดุประสานร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 และ 150 ของน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ

- ปูนขาวดิบ โดยใช้ อัตราส่วนผสมวัสดุประสานร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 และ 150 ของน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ
- ปูนขาวดิบ ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนผสมวัสดุประสานร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 และ 150 ของน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบ

2) การผสมซีเมนต์หลังการเผากากตะกอนน้ำมันดิบที่อุณหภูมิ 400 °ซ กับวัสดุ  
ประสาน คือ

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง โดยใช้อัตราส่วนผสมวัสดุ  
ประสาน ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ของน้ำหนักซีเมนต์
- ปูนขาวดิบ โดยใช้อัตราส่วนผสมวัสดุประสานร้อยละ 10, 20, 30, 40  
และ 50 ของน้ำหนักซีเมนต์
- ปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งในอัตราส่วน 1:1 โดย  
น้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนผสมวัสดุประสานร้อยละ 10, 20, 30, 40,  
และ 50 ของน้ำหนักซีเมนต์

3) การผสมซีเมนต์หลังการเผากากตะกอนน้ำมันดิบที่อุณหภูมิ 800 °ซ กับวัสดุ  
ประสาน คือ

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง โดยใช้อัตราส่วนผสมวัสดุ  
ประสานร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ของน้ำหนักซีเมนต์
- ปูนขาวดิบ โดยใช้อัตราส่วนผสมวัสดุประสานร้อยละ 10, 20, 30, 40  
และ 50 ของน้ำหนักซีเมนต์
- ปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งในอัตราส่วน 1:1 โดย  
น้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนผสมวัสดุประสานร้อยละ 10, 20, 30, 40  
และ 50 ของน้ำหนักซีเมนต์

4) การผสมซีเมนต์หลังการเผากากตะกอนน้ำมันดิบที่อุณหภูมิ 1200 °ซ กับ  
วัสดุประสาน คือ

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง โดยใช้อัตราส่วนผสมวัสดุประสาน  
ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ของน้ำหนักซีเมนต์
- ปูนขาวดิบ โดยใช้อัตราส่วนผสมวัสดุประสานร้อยละ 10, 20, 30, 40  
และ 50 ของน้ำหนักซีเมนต์

- ปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนผสมวัสดุประสานร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ของน้ำหนักซีเมนต์

รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างและอัตราส่วนผสมของวัสดุประสานชนิดต่างๆ ในการทดสอบหาสัดส่วนผสมเบื้องต้น แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

| ประเภทของภาคตะกอน                     | วัสดุประสาน   | สัดส่วนผสมของวัสดุประสาน (ร้อยละ)  |
|---------------------------------------|---|--|
| ภาคตะกอนน้ำมันดิบ                     | 1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง<br>2. ปูนขาวดิบ<br>3. ปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1) | 0, 10, 20, 30 ถึง 150<br>0, 10, 20, 30 ถึง 150<br>0, 10, 20, 30 ถึง 150          |
| ซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 400° ซ   | 1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง<br>2. ปูนขาวดิบ<br>3. ปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1) | 0, 10, 20, 30, 40 และ 50<br>0, 10, 20, 30, 40 และ 50<br>0, 10, 20, 30, 40 และ 50 |
| ซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800° ซ   | 1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง<br>2. ปูนขาวดิบ<br>3. ปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1) | 0, 10, 20, 30, 40 และ 50<br>0, 10, 20, 30, 40 และ 50<br>0, 10, 20, 30, 40 และ 50 |
| ซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200° ซ | 1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง<br>2. ปูนขาวดิบ<br>3. ปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1) | 0, 10, 20, 30, 40 และ 50<br>0, 10, 20, 30, 40 และ 50<br>0, 10, 20, 30, 40 และ 50 |

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนผสมระหว่างภาคตะกอนน้ำมันดิบและซีเมนต์หลังการเผากับวัสดุประสานชนิดต่างๆ สำหรับการทดสอบหาสัดส่วนผสมเบื้องต้น

#### 4.2.2. การทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด

ชนิดของวัสดุประสาน และสัดส่วนผสมที่เหมาะสมเบื้องต้นที่ได้จากการศึกษาในขั้นตอน 4.2.1 จะนำมาทำการปรับลดอัตราส่วนผสมของวัสดุประสานอย่างละเอียด เพื่อให้ได้สัดส่วนผสมที่เหมาะสมและประหยัดที่สุด โดยที่ตะกอนที่แข็งตัวแล้ว ยังมีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานของทางราชการ โดยจะวิเคราะห์หาค่า As, Cd, Cr, Hg, Pb, pH, ในน้ำชะละลาย, ค่ากำลังรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength) ของก้อนแข็งที่เวลาบ่ม 28 วัน แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) ซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 400 °C ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งเป็นวัสดุประสานในอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 40, 42, 44, 46, 48 และ 50 ของน้ำหนักซีเมนต์

2) ซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งเป็นวัสดุประสานในอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 30, 32, 34, 36, 38 และ 40 ของน้ำหนักซีเมนต์

3) ซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งเป็นวัสดุประสานในอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 10, 12, 14, 16, 18 และ 20 ของน้ำหนักซีเมนต์

ทั้งนี้จะทำการหาค่าความซึมผ่านของน้ำและปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปกับตัวอย่างซีเมนต์หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C เท่านั้น เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการทำวิจัยรายละเอียดของการเตรียมตัวอย่างและสัดส่วนผสมของวัสดุประสานชนิดต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 4.2

#### 4.2.3. การหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลายของก้อนตัวอย่างที่ผ่านการศึกษาค้นคว้าหาสัดส่วนผสมของวัสดุประสานที่เหมาะสมที่สุดแล้ว เปรียบเทียบกับปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลายของกากตะกอนน้ำมันดิบ นำมาคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิด (As, Cd, Cr, Hg และ Pb)

รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างและอัตราส่วนผสมของวัสดุประสาน  
ในขั้นตอนการทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด แสดงในตารางที่ 4.2

| ประเภทของ<br>ตะกอน                       | วัสดุประสาน                         | สัดส่วนผสมของ<br>วัสดุประสาน<br>(ร้อยละ) |
|--|-------------------------------------|--|
| ซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ<br>400° ซ   | ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์<br>ประเภทหนึ่ง | 40                                       |
|  |                                     | 42                                       |
|  |                                     | 44                                       |
|  |                                     | 46                                       |
|  |                                     | 48                                       |
|  |                                     | 50                                       |
| ซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ<br>800° ซ   | ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์<br>ประเภทหนึ่ง | 43                                       |
|  |                                     | 32                                       |
|  |                                     | 34                                       |
|  |                                     | 36                                       |
|  |                                     | 38                                       |
|  |                                     | 40                                       |
| ซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ<br>1,200° ซ | ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์<br>ประเภทหนึ่ง | 10                                       |
|  |                                     | 12                                       |
|  |                                     | 14                                       |
|  |                                     | 16                                       |
|  |                                     | 18                                       |
|  |                                     | 20                                       |

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนผสมระหว่างซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ  
กับวัสดุประสานสำหรับการทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด

$$\text{ประสิทธิภาพของการกำจัดโลหะหนัก} = \frac{Co - Cs}{Co} \times 100$$

Cs = ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย  
ซีเมนต์ของกากตะกอนน้ำมันดิบ ภายหลัง  
ผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน มีหน่วยเป็น  
มก./ล.

Co = ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายของ  
กากตะกอนน้ำมันดิบ ก่อนผ่านกระบวนการ  
ทำให้เป็นก้อน มีหน่วยเป็น มก./ล.

#### 4.2.4 การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการกำจัดกากตะกอนน้ำมันดิบ

การประมาณค่าใช้จ่ายจะคิดรวมค่าใช้จ่ายทุกอย่างที่ใช้ในการทำเสถียรกาก-  
ตะกอนน้ำมันดิบ โดยรวมถึงค่าสารเคมี ค่าแรงงาน ค่าขนส่ง และค่าฝังกลบขั้นสุดท้ายด้วย

### 4.3 ขั้นตอนการทดลอง

#### 4.3.1 ขั้นตอนที่ 1 นำกากตะกอนน้ำมันดิบมาเผาที่อุณหภูมิ 400, 800 และ 1,200 ซ

กากตะกอนน้ำมันดิบที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์โดยการจัดหา  
และประสานงานระหว่าง การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย กับ บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด  
โดยกากตะกอนที่ได้รับมาบรรจุอยู่ในถังขนาด 200 ลิตรที่ปิดสนิท 2 ถังด้วยกัน จากการ  
ประมาณปริมาตรกากตะกอนที่ได้รับมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้คร่าวๆ ประมาณ 300 ลิตร ผู้วิจัย  
แบ่งกากตะกอนออกเป็น 4 ส่วน โดยส่วนแรกคือ กากตะกอนน้ำมันดิบที่เก็บไว้ใช้ในการ  
ทดสอบสมบัติต่างๆ เพื่อใช้เป็นตัวอย่างในการอ้างอิงการทดลองอื่นๆ นำส่วนที่เหลือมาแบ่งเผา  
ที่อุณหภูมิ 400, 800 และ 1,200 ซ ด้วยเตาเผาเชื้อเพลิงแก๊สของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะ-  
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากกากตะกอนน้ำมันดิบที่ทำการแบ่งไว้ทั้ง 3 ส่วน  
นำส่วนแรก (ประมาณ 70 กิโลกรัม) มาทยอยแบ่งเผา เนื่องจากเตาเผาที่ใช้มีขนาดจำกัด โดย  
ดักกากตะกอนน้ำมันดิบใส่ในภาชนะเซรามิกกันแบน เกลี่ยให้มีระดับความสูงประมาณ 1 นิ้ว  
(เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างทั่วถึง) จากนั้นนำเข้าเตาเผาชนิดเชื้อเพลิงแก๊ส ตั้งอุณหภูมิใน  
การเผาเท่ากับ 400 ซ จากนั้นจุดไฟเผาจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 400 ซ (ในช่วงเวลาระหว่างนี้  
มีควันออกจากปล่องระบายอากาศของเตาเผาพอสมควร) รักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่เป็น  
ระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง จากนั้นปิดการทำงานของหัวเผาและเชื้อเพลิง รอให้ซีเมนต์มีอุณหภูมิลด  
ต่ำลงโดยใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง นำออกจากเตาเผาเก็บไว้ในภาชนะปิด ก่อนนำมาใช้ทดลอง  
ในขั้นตอนต่อไป

ส่วนการเผากากตะกอนน้ำมันดิบที่อุณหภูมิ 800 ช และ 1,200 ช ดำเนินการตามขั้นตอนเช่นเดียวกับการเผาที่อุณหภูมิ 400 ช เพียงแต่เปลี่ยนอุณหภูมิในการเผาให้เป็น 800 ช และ 1,200 ช ตามลำดับ

#### 4.3.2 ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์สมบัติของกากตะกอนน้ำมันดิบและซีเถ้าหลังการเผา

หลังจากแบ่งกากตะกอนน้ำมันดิบนำไปเผาจนได้ซีเถ้าหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 400, 800 และ 1,200 ช แล้วนำกากตะกอนน้ำมันดิบและซีเถ้าที่ผ่านการเผา มาวิเคราะห์หาสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีตามขั้นตอนดังนี้ คือ

##### 1) ขั้นตอนการทดสอบหาสมบัติทางกายภาพ

###### • การหาค่าความหนาแน่นรวม

ผู้วิจัยตวงกากตะกอนน้ำมันดิบด้วยกระบอกตวงขนาด 1,000 ลบ.ซม. มา 2 ตัวอย่าง ใส่ในบีกเกอร์ ขนาด 1,000 ลบ.ซม. (ซึ่งน้ำหนักไว้ก่อนแล้ว) จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งขนาด 2,000 กรัม เพื่อหาน้ำหนักของกากตะกอนน้ำมันดิบที่ปริมาตร 1,000 ลบ.ซม. เมื่อหักลบจากน้ำหนักภาชนะแล้ว นำน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบที่หาได้มาคำนวณหาค่าความหนาแน่นรวม (อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต่อปริมาตรของกากตะกอนน้ำมันดิบ) ของทั้ง 2 ตัวอย่าง แล้วคำนวณเป็นค่าความหนาแน่นรวมเฉลี่ยของกากตะกอนน้ำมันดิบ (ตามมาตรฐาน ASTM D 2216-80)

สำหรับการหาค่าความหนาแน่นรวมของซีเถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400, 800 และ 1,200 ช นั้น มีขั้นตอนเช่นเดียวกับการหาค่าความหนาแน่นรวมของกากตะกอนน้ำมันดิบเพียงแต่เปลี่ยนกากตะกอนน้ำมันดิบเป็นซีเถ้าหลังการเผาเท่านั้น

###### • การหาค่าปริมาณน้ำบรรจุ

ผู้วิจัยนำกากตะกอนน้ำมันดิบ 2 ตัวอย่าง มาชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำเข้าสู่ตู้อบที่ปรับอุณหภูมิเท่ากับ 105 ช เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ปล่อยให้เย็นลงในโถทำแห้ง (Desiccator) แล้วชั่งน้ำหนักหาผลต่างระหว่างน้ำหนักของกากตะกอนน้ำมันดิบก่อนเข้าอบกับน้ำหนักหลังผ่านการอบแล้ว ต่อน้ำหนักกากตะกอนน้ำมันดิบก่อนผ่านการอบจะได้เป็นค่าร้อยละของปริมาณน้ำบรรจุ นำทั้ง 2 ค่ามาหาค่าเฉลี่ย (มาตรฐาน ASTM D 2216-80)

สำหรับการหาปริมาณน้ำบรรจุของซีเถ้าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400, 800 และ 1,200 ช ดำเนินขั้นตอนเช่นเดียวกันเพียงเปลี่ยนกากตะกอนน้ำมันดิบเป็นซีเถ้าที่ผ่านการเผาทั้ง 3 อุณหภูมิ

###### • การหาค่าปริมาณน้ำมันและไขมัน

ทำการชั่งตัวอย่างกากตะกอนน้ำมันดิบเพื่อหาเนื้อกากตะกอนน้ำมันดิบแห้ง คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักก่อน (% dry solids) จากนั้นชั่งตัวอย่างกากตะกอนน้ำมันดิบอีกตัวอย่างหนึ่งเท่ากับตัวอย่างแรกใส่ในบีกเกอร์ขนาด 150 ลบ.ซม. ทำการปรับพีเอชให้มีค่า



น้อยกว่า 2.0 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Conc. HCl) เติมแมกนีเซียมซัลเฟตโมโนไฮเดรต และใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากัน จะมีลักษณะชั้นคล้ายแป้งชั้นแผ่บางๆ ข้างบีกเกอร์ ตั้งทิ้งไว้ให้แข็ง ประมาณ 15-30 นาที นำออกจากบีกเกอร์ไปบดจนละเอียด เทใส่ในเอกซ์แทรกชันทิมเบล ส่วนที่เหลืออยู่ในบีกเกอร์เขี่ยออกให้หมดด้วยกระดาษกรอง แล้วนำกระดาษกรองไปใส่ใน เอกซ์แทรกชันทิมเบล ปิดทับด้วยใยแก้วอีกชั้นหนึ่ง นำเอกซ์แทรกชันทิมเบลนี้ไปสกัดใน เครื่องสกัดซอกซ์เลตโดยใช้เฮกเซนเป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง นำของเหลวส่วนที่สกัดได้ไปทำให้แห้งบนเครื่องอ้งน้ำที่อุณหภูมิ 85 °C ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถทำแห้ง (Desiccator) และแยกออกไป ชั่งน้ำหนัก แล้วจึงคำนวณหาปริมาณร้อยละของน้ำหนักน้ำมันและไขมันโดยใช้สูตร

$$\text{ค่าร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน} = \frac{A \times 100}{B \times \text{ภาคตะกอนน้ำมันแห้ง}}$$

A = น้ำหนักเป็นกรัมของน้ำมันและไขมัน

B = น้ำหนักเป็นกรัมของภาคตะกอน

การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันและไขมันในซีเมนต์หลังการเผาภาคตะกอน น้ำมันดิบที่อุณหภูมิ 400, 800 และ 1,200 °C ดำเนินการตามขั้นตอนข้างต้นเพียงแต่เปลี่ยน ภาคตะกอนน้ำมันดิบเป็นซีเมนต์หลังการเผา

- การหาค่ากำลังรับแรงอัด

การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ดำเนินการ ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM C 109-86 (รายละเอียดในภาคผนวก ง วิธีมาตรฐานที่ใช้ใน การวิเคราะห์) ภาคตะกอนน้ำมันดิบเป็นภาคตะกอนที่มีลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลวคล้ายดินเลน ส่วน ซีเมนต์หลังการเผาที่ได้ก็มีลักษณะเป็นผงร่วนละเอียด ไม่สามารถทำให้แข็งตัวเป็นก้อนได้ (ไม่ ผสมกับวัสดุประสานอื่นๆ) ดังนั้นจึงไม่สามารถนำมาทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C 109-86 ได้

## 2) ขั้นตอนการทดสอบหาสมบัติทางเคมี

หลังจากนำภาคตะกอนน้ำมันดิบและซีเมนต์หลังการเผาทั้ง 3 อุณหภูมิ มา ทดสอบหาสมบัติทางกายภาพแล้ว ผู้วิจัยนำภาคตะกอนน้ำมันดิบและซีเมนต์หลังการเผาที่ อุณหภูมิ 400, 800 และ 1,200 °C มาทดสอบการสกัดสารตามวิธีมาตรฐานของกรมโรงงาน อุตสาหกรรม (รายละเอียดในภาคผนวก ก.) และนำน้ำชะละลายมาวิเคราะห์หาค่าพีเอช และ โลหะหนัก 5 ชนิด คือ อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม โปรทและตะกั่ว โดยมีขั้นตอนการ ทดลองโดยสังเขปคือ นำตัวอย่างของภาคตะกอนน้ำมันดิบมา 50 กรัม ใส่ในถ้วยชั่งละลาย ซึ่ง ประกอบด้วย น้ำกลั่นผสมกรดไฮโดรคลอริก พีเอช 6.0 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ใส่ขวด พลาสติก (PP) ขนาด 1 ลิตร จากนั้นนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่า ปรับความเร็วเท่ากับ 200 รอบ ต่อนาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง กรองสารละลายผ่านกระดาษกรองใยแก้ว ขนาดรู 1 ไมครอน ด้วยเครื่องกรองแบบสูญญากาศ เมื่อได้ของเหลวที่ผ่านการชะละลายข้างต้นแล้ว นำไปวัด

ค่าพีเอช หลังจากนั้นก็ให้นำไปวัดหาปริมาณโลหะหนักโดยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน-สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ต้องนำน้ำมาเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการย่อยสลายสารอินทรีย์และสารประกอบโลหะหนักในน้ำชะละลายให้แตกตัวกลายเป็นไอออนอิสระ โดยนำน้ำตัวอย่างมาเติมกรดไนตริกเข้มข้น (Conc.  $\text{HNO}_3$ ) 2.5 ลบ.ซม. เขย่าให้ผสมกันดีแล้วแบ่งตัวอย่างมา 100 ลบ.ซม. ถ่ายลงบีกเกอร์ขนาด 250 ลบ.ซม. เติมกรดไฮโดรคลอริก (1 + 1) จำนวน 5 ลบ.ซม. นำไปอุ่นบนเครื่องอังไอน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 95<sup>o</sup> ซ เป็นเวลา 15 นาที จะได้ของเหลวใส จากนั้นปรับปริมาตรสุดท้ายด้วยน้ำกลั่นให้เท่ากับ 100 ลบ.ซม. ก่อนนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

#### 4.3.3 ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบหาสัดส่วนผสมเบื้องต้น

##### การทดลองที่ 1 การผสมกากตะกอนน้ำมันดิบกับวัสดุประสาน

จากแนวทางการศึกษากำหนดวัสดุประสานที่ใช้ในการทดลองไว้ 3 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ ปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1 โดยน้ำหนัก) โดยแปรอัตราส่วนผสมของวัสดุประสานตั้งแต่ร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50 จนถึง 150 ต่อน้ำหนักของกากตะกอนน้ำมันดิบ (จากการทดสอบในเบื้องต้นพบว่า อัตราส่วนผสมวัสดุประสานต่อกากตะกอนน้ำมันดิบ ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 50 ไม่สามารถทำให้กากตะกอนน้ำมันดิบแข็งตัวเป็นก้อนได้ ดังนั้นจึงเพิ่มอัตราส่วนผสมของวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ในอัตราส่วนร้อยละ 10 จนถึงที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อกากตะกอนน้ำมันดิบเป็นร้อยละ 150) และจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า อัตราส่วนของน้ำที่ใช้ในส่วนผสมต่อปริมาณวัสดุประสาน (W/C) ที่เหมาะสมสำหรับการทำให้กากตะกอนของเสียอินทรีย์เป็นก้อนแข็งได้ดี คือ 0.35 และสำหรับกากของเสียอินทรีย์คือ 0.50 (Jaggi, 1988) นอกจากนี้ยังพบว่า การแปรเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/C) มีผลต่อการชะละลายโลหะหนักและกำลังรับแรงอัดของก้อนแข็ง โดยการเพิ่มอัตราส่วน W/C จะทำให้กำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์แข็งลดต่ำลง และการชะละลายโลหะหนักมีอัตราเพิ่มสูงขึ้น (Shively และคณะ, 1986) ดังนั้น งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาหาวิธีการบำบัดและกำจัดกากตะกอนน้ำมันดิบด้วยการนำมาเผา โดยมีตัวแปรที่สำคัญคือชนิดและสัดส่วนผสมของวัสดุประสาน การวิจัยในครั้งนี้จึงกำหนดให้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.5 ตลอดการทดลอง เพื่อให้อัตราส่วนของน้ำในส่วนผสมมีอิทธิพลหรือเป็นตัวแปรที่มีต่อการวิจัยในครั้งนี้

- ขั้นตอนการผสมกากตะกอนน้ำมันดิบกับวัสดุประสานให้เป็นก้อนแข็ง

1) ชั่งกากตะกอนน้ำมันดิบหนัก 300 กรัม ปูนซีเมนต์ 30 กรัม และน้ำ ปริมาตร 15 ลบ.ซม. (W/C เท่ากับ 0.5 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก)

2) ผสมกากตะกอนน้ำมันดิบและปูนซีเมนต์ให้เข้ากันด้วยมือ (สวมถุงมือยาง) บนภาชนะที่ทำด้วยแผ่นกระจก จากนั้นก่อส่วนผสมเป็นรูปภูเขา โดยเจาะให้เป็นหลุมตรงกลาง เติมน้ำลงกลางหลุม พร้อมตักส่วนผสมจากด้านข้างลงกลางหลุม ปล่อยให้ซึมตัวด้วยน้ำ รวมเวลาประมาณ 1 นาที จากนั้นจึงเริ่มคลุกเคล้าให้เข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกัน

3) เทส่วนผสมลงในแบบหล่อพลาสติก ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ชั้นแรกหนาประมาณ 1 นิ้ว (2.5 เซนติเมตร) แล้วใช้ Tamper กระทุ้ง 16 ครั้ง โดย 8 ครั้งแรกให้มีทิศทางตั้งฉากกับ 8 ครั้งหลัง (ใช้แรงกระทุ้งเท่าๆ กันทุกครั้ง) ใช้เวลาช่วงนี้ประมาณ 10 วินาที จากนั้นเติมส่วนผสมจนล้นขอบแบบหล่อเล็กน้อย ทำการกระทุ้งโดยใช้ Tamper 16 ครั้ง เช่นเดียวกับครั้งแรก ใช้เวลาอีกประมาณ 10 วินาที แล้วใช้เกรียงปาดส่วนผสมที่เกินออก ทำซ้ำตั้งแต่แรกโดยใช้สัดส่วนเติมเพื่อหล่อก้อนตัวอย่างเพิ่มอีกหนึ่งก้อน (หล่อก้อนตัวอย่างทั้งหมด 2 ก้อนในแต่ละส่วนผสมเพื่อใช้ทดสอบหาค่าเฉลี่ย)

4) นำแบบหล่อที่เทส่วนผสมลงไปเรียบร้อยแล้วเก็บไว้ในที่ชื้นทันที และถอดแบบหล่อเมื่อครบ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำก้อนตัวอย่างมาบ่มโดยใช้ผ้ากระสอบชุมน้ำคลุมทับ 28 วัน อันเป็นเวลาทดสอบก้อนตัวอย่าง

จากขั้นตอนการผสมส่วนผสมที่อัตราส่วนวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์) ต่อกากตะกอนน้ำมันดิบเท่ากับร้อยละ 10 ข้างต้นนั้น ทำการแปรเปลี่ยนวัสดุประสานเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 20, 30, 40, 50 จนถึง 150 โดยชั่งกากตะกอนน้ำมันดิบ 300 กรัม 1 ตัวอย่าง และ 200 กรัม อีก 13 ตัวอย่าง ปูนซีเมนต์ 60, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280 และ 300 กรัม ส่วนน้ำ 30, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 และ 150 ลบ.ซม. ตามลำดับ จากนั้นทำการผสมกากตะกอนน้ำมันดิบ ปูนซีเมนต์ และน้ำ ตามวิธีการเช่นเดิมข้างต้น แล้วนำก้อนตัวอย่างทั้งหมดไปบ่มในที่ชื้นจนครบกำหนด 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบในขั้นตอนต่อไป

หลังจากการทดลองข้างต้นซึ่งใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานนั้น ผู้วิจัยทำการเปลี่ยนวัสดุประสานจากปูนซีเมนต์เป็นปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์ (1:1 โดยน้ำหนัก) ตามลำดับ โดยอัตราส่วนผสมวัสดุประสานต่อกากตะกอนน้ำมันดิบเท่าเดิม รวมถึงใช้ปริมาณกากตะกอนน้ำมันดิบ วัสดุประสาน น้ำ และวิธีการผสมเหมือนเดิม เพียงแต่เปลี่ยนชนิดวัสดุประสานเท่านั้น

หมายเหตุ ก้อนตัวอย่างที่เกิดจากการใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน เมื่อครบกำหนดถอดแบบ (24 ชั่วโมง) สามารถถอดแบบได้ตามปกติ แต่สำหรับก้อนตัวอย่างที่ใช้ปูนขาวดิบเป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว เมื่อครบกำหนดทำการถอดแบบ ก้อนตัวอย่างที่ใช้ปูนขาวดิบเป็นวัสดุประสานจะปริแตก ไม่สามารถถอดแบบออกมาเป็นก้อนลูกบาศก์ได้

การทดลองที่ 2 การผสมซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 400° ซ กับวัสดุประสาน

การทดลองที่ 2 นี้ ดำเนินตามวิธีการผสมซีเมนต์กับวัสดุประสานเช่นเดียวกับในการทดลองที่ 1 โดยเปลี่ยนวัตถุดิบจากกากตะกอนน้ำมันดิบไปเป็นซีเมนต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 400° ซ และใช้อัตราส่วนผสมของวัสดุประสานต่อซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5)

ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองนี้ (ซีเมนต์หลังการเผาที่ 400° ซ) คือ 300, 300, 200, 200 และ 200 กรัม โดยใช้วัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์, ปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์) เท่ากับ 30, 60, 60, 80 และ 100 กรัม ส่วนน้ำเท่ากับ 15, 30, 30, 40 และ 50 ลบ.ซม. ตามลำดับ หลังจากถอดแบบเมื่อครบกำหนดเวลา 24 ชั่วโมงแล้ว นำก้อนตัวอย่างทั้งหมดบ่มในที่ชื้นเป็นเวลา 28 วัน

**หมายเหตุ** ก้อนตัวอย่างของซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 400° ซ ที่ใช้ปูนขาวดิบเป็นวัสดุประสานนั้นทำการถอดแบบตามกำหนดเวลา (24 ชั่วโมง) ก้อนตัวอย่างเกิดการปริแตกโดยไม่สามารถคงรูปเป็นก้อนแข็งที่เหลี่ยมลูกบาศก์ได้

การทดลองที่ 3 การผสมซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800° ซ กับวัสดุประสาน

การทดลองที่ 3 ดำเนินตามวิธีการเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2 เพียงแต่เปลี่ยนวัตถุดิบเป็นซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800° ซ โดยใช้อัตราส่วนผสมวัสดุประสานต่อซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5)

ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองที่ 3 นี้ คือ 300, 300, 200, 200 และ 200 กรัม โดยใช้วัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ ปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์) เท่ากับ 30, 60, 60, 80 และ 100 กรัม ส่วนผสมน้ำเท่ากับ 15, 30, 30, 40 และ 50 ลบ.ซม. ตามลำดับ หลังผสมแล้วเทลงแบบหล่อรองจนครบเวลา 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบแล้วนำไปบ่มในที่ชื้นเป็นเวลา 28 วัน

**หมายเหตุ** ก้อนตัวอย่างซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800° ซ ซึ่งผ่านการผสมกับปูนขาวดิบนั้น ทำการถอดแบบเมื่อครบตามกำหนดเวลา พบว่า ก้อนตัวอย่างไม่สามารถคงรูปเป็นก้อนสี่เหลี่ยมได้

การทดลองที่ 4 การผสมซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200° ซ กับวัสดุประสาน

การทดลองที่ 4 นี้ ทำการผสมซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200° ซ กับวัสดุประสานทั้ง 3 ชนิด โดยมีขั้นตอนและวิธีการผสมดังรายละเอียดที่ได้นำเสนอไปแล้วในการทดลองที่ 1 การทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 เพียงแต่เปลี่ยนเป็นซีเมนต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,200° ซ โดยอัตราส่วนผสมวัสดุประสานต่อซีเมนต์ยังคงเป็นร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5)

ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองที่ 4 เท่ากับ 300, 300, 200, 200 และ 200 กรัม โดยใช้วัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ ปูนขาวดิบ และปูนขาวดิบผสมปูนซีเมนต์) เท่ากับ 30, 60, 60, 80 และ 100 กรัม ส่วนผสมของน้ำเท่ากับ 15, 30, 30, 40 และ 50 ลบ.ซม. ตามลำดับ

**หมายเหตุ** ก้อนตัวอย่างที่ใช้ปูนขาวดิบอย่างเดียวเป็นวัสดุประสานนั้น ก้อนตัวอย่างไม่สามารถถอดแบบให้คงรูปเป็นก้อนแข็งที่เหลี่ยมลูกบาศก์ได้เช่นกัน

**ข้อสังเกต** จากการนำซีเมนต์ที่ผ่านการเผาทั้ง 3 อุณหภูมิมาเป็นวัตถุดิบผสมกับวัสดุประสานชนิดต่างๆ ขณะที่อัตราส่วนผสมของวัสดุประสานน้อยๆ (อัตราส่วนน้ำที่ใช้ผสมก็ลดลงตามส่วนไปด้วย) พบว่า น้ำที่เติมลงไปขณะทำการผสมจะถูกดูดซับอย่างรวดเร็วทำให้การผสมค่อนข้างลำบาก เนื่องจากส่วนผสมจะมีลักษณะแห้งร้อนไม่เหลวอย่างที่ควรจะเป็นทั้งนี้น้ำจะเป็นผลมาจากความต้องการน้ำของซีเมนต์ซึ่งเมื่อถูกเผาแล้ว ปริมาณน้ำในซีเมนต์จะเหลือปริมาณน้อยมาก แต่ทั้งนี้ยังสามารถเทส่วนผสมใส่ลงในแบบหล่อพลาสติก จากนั้นอัดกระทุ้งด้วย Tamper ส่วนเมื่ออัตราส่วนวัสดุประสานเพิ่มมากขึ้น ส่วนผสมที่ได้หลังเติมน้ำแล้ว มีลักษณะชื้นเหลวเหมือนกับการผสมปูนซีเมนต์โดยปกติทั่วไป

#### การทดลองที่ 5 การทดสอบก่อนตัวอย่างหลังผ่านการทำให้เป็นก้อนแข็ง

เนื่องจากการศึกษานี้เป็นการศึกษาถึงแนวทางในการทำเสถียรภาคตะกอนน้ำมันดิบและซีเมนต์หลังการเผาให้สามารถนำไปกำจัดโดยวิธีการฝังกลบได้ตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2531) ดังนั้น วิธีการทดสอบสมบัติของก้อนตัวอย่างจะยึดถือปฏิบัติตาม ข้อกำหนดของประกาศดังกล่าว นำก้อนตัวอย่างที่ผ่านการถอดแบบและบ่มในที่ชื้นเป็นระยะเวลา 28 วัน มาทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดและปริมาณความชื้นชั้นโลหะหนักในน้ำชะละลาย

- การทดสอบกำลังรับแรงอัด มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

นำก้อนตัวอย่างที่ผ่านการบ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน ครบตามกำหนดแล้ว มาชั่งน้ำหนักและวัดขนาดมิติ กว้างxยาวxสูง ของลูกบาศก์ จากนั้นทำสัญลักษณ์หน้าตัดด้านที่จะให้แรงกดสัมผัสพื้นที่ผิวนั้น (ต้องเป็นด้านที่ทราบพื้นที่หน้าตัด และมีพื้นผิวที่เรียบ) จากนั้นวางก้อนตัวอย่างบน plate ที่จะใช้กดก้อนตัวอย่างโดยให้อยู่ในแนวศูนย์กลางของเครื่องทดสอบ จากนั้นเปิดเครื่องปล่อยให้ระบบไฮดรอลิคค่อยๆ กดก้อนตัวอย่างอย่างสม่ำเสมอจนก้อนตัวอย่างเกิดการวิบัติ (เวลาที่ใช้ทดสอบอยู่ระหว่าง 20-80 วินาที) บันทึกค่าแรงกดสูงสุดจากเครื่องกด ซึ่งเป็นหน่วยนิวตันก่อนเปลี่ยนเป็นกิโลกรัม และคำนวณให้อยู่ในค่าของ ก.ก./ตร.ซม. โดยการนำพื้นที่หน้าตัดด้านสัมผัสแรงกดไปหารค่าแรงกดที่วัดได้ (ทำการวัดทั้ง 2 ก้อนตัวอย่าง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย)

ก้อนตัวอย่างที่ผ่านการบ่ม 28 วันแล้วทั้งหมด นำมาดำเนินการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดโดยรายละเอียดและขั้นตอนการทดสอบเดียวกับข้างต้น

- การทดสอบหาปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลาย

หลังจากทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างแล้วนำก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบแล้วนั้นมาทำการทดสอบตามวิธีการสกัดสารของกรมโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อนำน้ำชะละลายที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนัก 5 ชนิด มีรายละเอียดดังนี้

นำก้อนตัวอย่างมาบดให้มีขนาดระหว่าง 0.5 ถึง 5 มิลลิเมตร จำนวน 50 กรัม ใส่ในตัวทำละลายซึ่งประกอบด้วย น้ำกลั่นผสมกับกรดไฮโดรคลอริกที่ค่าพีเอช 6.0

500 มิลลิลิตร (10 เท่าของน้ำหนักของตัวอย่าง) เขย่าบนเครื่องเขย่าชนิด 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง ใยแก้วขนาดรู 1 ไมครอน โดยก่อนนำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer นั้นต้องเตรียมตัวอย่างน้ำโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์และแตกตัวไอออนของโลหะหนักที่อาจรวมตัวเป็นสารประกอบในน้ำให้เป็นไอออนอิสระเพื่อความถูกต้องที่สุดใน การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer นำน้ำที่ผ่านการชะละลาย มาเติมกรดไนตริกเข้มข้น (Conc. HNO<sub>3</sub>) จำนวน 2.5 ลบ.ซม. จากนั้นแบ่งตัวอย่างน้ำที่เขย่า ให้เข้ากันดีแล้ว จำนวน 100 ลบ.ซม. มาเติมกรดไฮโดรคลอริก (1 + 1) จำนวน 5 ลบ.ซม. นำ ไปอุ่นให้ร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C บนเครื่องอังไอน้ำประมาณ 15 นาที (หรือจนของเหลวที่ได้ใส) จากนั้นปรับปริมาตรสุดท้ายให้เท่ากับ 100 ลบ.ซม. ก่อนจะนำเข้าเครื่อง AA Spectrophotometer วัดค่าปริมาณโลหะหนัก As, Cd, Cr, Hg และ Pb

#### 4.3.4 ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด

การทดลองที่ 1 การผสมซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 400 °C กับปูนซีเมนต์

อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์หลังการเผาที่ 400 °C เท่ากับร้อยละ 40, 42, 44, 46, 48 และ 50 (ที่อัตราส่วนร้อยละ 40 และ 50 ใช้ข้อมูลเดิมจากขั้นตอนการหา สัดส่วนผสมเบื้องต้น) โดยนำซีเมนต์หนัก 200 กรัม ผสมกับปูนซีเมนต์ 84, 88, 92 และ 96 กรัม และน้ำ 42, 44, 46 และ 48 ลบ.ซม. ตามลำดับ

ลำดับขั้นตอนและรายละเอียดในการผสมและหล่อก้อนแข็งนั้น มีวิธีการเดียวกัน กับการทดลองในขั้นตอนที่ 3 (หัวข้อ 4.3.3) จากนั้นนำก้อนแข็งที่ถอดแบบแล้ว (24 ชั่วโมง) ไปบ่มในที่ชื้นเป็นเวลา 28 วัน

การทดลองที่ 2 การผสมซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C กับปูนซีเมนต์

อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 30, 32, 34, 36, 38 และ 40 (โดยที่อัตราส่วนร้อยละ 30 และ 40 เป็นข้อมูลเดิมจากขั้นตอนการทดสอบหาสัดส่วนผสม เบื้องต้น) โดยนำซีเมนต์หนัก 200 กรัม ผสมกับปูนซีเมนต์ 64, 68, 72 และ 76 กรัม และน้ำ 32, 34, 36 และ 38 ลบ.ซม. ตามลำดับ มีขั้นตอนและรายละเอียดวิธีการผสมและหล่อ ก้อนแข็งเช่นเดียวกับในการทดลองขั้นตอนที่ 3 (หัวข้อ 4.3.3) จากนั้นนำก้อนแข็งที่ถอดแบบ เมื่อครบกำหนด 24 ชั่วโมงไปบ่มในที่ชื้นเป็นเวลา 28 วัน

การทดลองที่ 3 การผสมซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C กับปูนซีเมนต์

อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 10, 12, 14, 16, 18 และ 20 (โดยที่อัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 ใช้ข้อมูลเดิมจากขั้นตอนการทดสอบหาสัดส่วนผสม เบื้องต้น) โดยนำซีเมนต์ 300 กรัม ผสมกับปูนซีเมนต์ 36, 42, 48 และ 54 กรัม และน้ำ 18, 21, 24 และ 27 ลบ.ซม. ตามลำดับ มีขั้นตอนวิธีการผสมและรายละเอียดเช่นเดียวกับการ

ผสม ภาคตะกอนกับวัสดุประสานในการทดลองขั้นตอนที่ 3 (หัวข้อ 4.3.3) จากนั้นนำก้อนแข็งที่ถอดแบบแล้ว (24 ชั่วโมง) ไปบ่มในที่ชื้นเป็นเวลา 28 วัน

#### การทดลองที่ 4 การทดสอบก้อนตัวอย่างหลังผ่านการทำให้เป็นก้อนแข็ง

นำก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแข็งของซีเมนต์หลังการเผาทั้ง 3 อุณหภูมิ ซึ่งผ่านการบ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน มาทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด, ความหนาแน่น, ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายและค่าความซึมน้ำได้

- การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 2216-80 ดังรายละเอียดเช่นเดียวกับการทดลองที่ 5 (หัวข้อ 4.3.3)

- การหาค่าความหนาแน่น

จากขั้นตอนการนำก้อนตัวอย่างไปวัดหาค่ากำลังรับแรงอัดทำให้ทราบขนาดของก้อนตัวอย่าง (กว้างxยาวxสูง) ซึ่งคำนวณเป็นปริมาตรได้ และทราบน้ำหนักของก้อนตัวอย่างด้วย นำข้อมูลทั้งสองมาหาค่าความหนาแน่นได้เท่ากับอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต่อปริมาตรของก้อนตัวอย่าง

- การทดสอบหาปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย

ทดสอบตามขั้นตอนดังรายละเอียดเช่นเดียวกับการทดลองที่ 5 (หัวข้อ 4.3.3)

- การทดสอบหาค่าความซึมน้ำได้

ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 2434-68 (Standard. Test Method for Permeability of Granular Soils) โดยเครื่องมือทดสอบแบบ Triaxial Test (ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย) กับก้อนตัวอย่างของซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200° ซ เตรียมก้อนตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง ด้วยอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 16 โดยใช้ซีเมนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200° ซ ปริมาณ 1,000 กรัม ผสมกับปูนซีเมนต์ 160 กรัม น้ำ 80 ลบ.ซม. ดำเนินขั้นตอนการผสมตามรายละเอียดที่นำเสนอในการทดลองที่ 1 (หัวข้อ 4.3.3) จากนั้นเทลงแบบหล่อซึ่งทำจากท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว ให้มีความสูงประมาณ 1 นิ้ว (ก้อนตัวอย่างจะเป็นรูปทรงกระบอก) จำนวน 3 ตัวอย่าง จากนั้นนำไปเก็บในที่ชื้นทันที ครบกำหนด 24 ชั่วโมง ถอดออกจากแบบหล่อแล้วนำไปบ่มในที่ชื้นต่ออีก 28 วัน จึงส่งก้อนตัวอย่างไปทดสอบหาอัตราความซึมน้ำด้วยเครื่องทดสอบแบบ Triaxial Test ของฝ่ายปฐพีวิทยา กองปฐพีวิทยา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย