

## สารบัญ

|                                                                                      | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย                                                                      | ก    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ                                                                   | ค    |
| กิตติกรรมประกาศ                                                                      | ฉ    |
| สารบัญ                                                                               | ช    |
| สารบัญตารางประกอบ                                                                    | ญ    |
| สารบัญรูปประกอบ                                                                      | ฎ    |
| บทที่ 1 บทนำ                                                                         | 1    |
| 1.1 คำนำ                                                                             | 1    |
| 1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา                                                   | 1    |
| 1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการทดสอบ                                                 | 2    |
| บทที่ 2 วรรณคดีวิจารณ์                                                               | 4    |
| 2.1 คำนำ                                                                             | 4    |
| 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีและปฏิกิริยาไฮเดรชันของ<br>ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่วเตาถลุง | 4    |
| 2.3 สิ่งที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของตะกั่วเตาถลุง                                     | 5    |
| 2.3.1 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตเหล็กเตาหลอม                                                 | 6    |
| 1. สินแร่เหล็ก                                                                       | 6    |
| 2. ถ่านโค้ก                                                                          | 6    |
| 3. หินปูน                                                                            | 6    |
| 4. อากาศ                                                                             | 7    |
| 2.3.2 เตาถลุงเหล็กดิบ                                                                | 7    |
| 1. ส่วนยอดเตา                                                                        | 7    |
| 2. ส่วนปล่องเตา                                                                      | 7    |
| 3. ส่วนหลอมละลาย                                                                     | 7    |

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 4. ส่วนกันเทา                                                | 7  |
| 2.4 คุณสมบัติของมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุง           | 10 |
| 2.4.1 ความต้องการน้ำและความสามารถทำงานได้                    | 10 |
| 2.4.2 เวลาการก่อตัว                                          | 11 |
| 2.4.3 วิธีการบ่ม                                             | 12 |
| 2.4.4 กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด                        | 13 |
| 2.4.5 ความสามารถซึมผ่านได้                                   | 17 |
| 2.4.6 การต้านทานสารเคมี                                      | 21 |
| 2.4.7 การคืบและการหดตัวของคอนกรีต                            | 22 |
| 2.4.8 ความเสียหายเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างต่างกับหิน         | 24 |
| 2.4.9 ความเสียหายเนื่องจากการแข็งตัวและการละลาย              | 24 |
| 2.4.10 การกัดกร่อนของเหล็กเสริม                              | 25 |
| บทที่ 3 การทดสอบ                                             | 26 |
| 3.1 แผนการดำเนินการวิจัย                                     | 26 |
| 3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ                                    | 27 |
| 1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์                                      | 27 |
| 2. ตะกรันเตาถลุง                                             | 27 |
| 3. ทราช                                                      | 27 |
| 4. น้ำ                                                       | 27 |
| 3.3 การทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุง | 27 |
| 1. การทดสอบความถ่วงจำเพาะ                                    | 27 |
| 2. การทดสอบหาความละเอียด                                     | 27 |
| 3. การทดสอบความถ่วงจำเพาะของทราช                             | 31 |
| 4. การทดสอบความชื้นเหลือปกติ                                 | 31 |

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| 5 การทดสอบระยะเวลาในการก่อตัว                                      | 31 |
| 6 การทดสอบกำลังรับแรงอัด                                           | 31 |
| 7 การทดสอบกำลังรับแรงดึง                                           | 36 |
| 3.4 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่วเหล็ก | 36 |
| 1. การทดสอบการต้านทานสารเคมี                                       | 36 |
| 2. การทดสอบการหดตัวเมื่อแห้ง                                       | 37 |
| 3. การทดสอบการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์เมื่อแห้ง                        | 37 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล                                     | 38 |
| 4.1 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์                                      | 38 |
| 4.2 การทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่วเหล็ก         | 39 |
| 4.2.1 สารประกอบทางเคมี                                             | 39 |
| 4.2.2 ความถ่วงจำเพาะ                                               | 39 |
| 4.2.3 ความละเอียด                                                  | 41 |
| 4.2.4 ความชื้นเหลือปกติ                                            | 41 |
| 4.2.5 ระยะเวลาการก่อตัว                                            | 41 |
| 4.2.6 กำลังรับแรงอัด                                               | 45 |
| 4.2.7 กำลังรับแรงดึง                                               | 48 |
| 4.3 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่วเหล็ก | 51 |
| 4.3.1 การต้านทานสารเคมี                                            | 51 |
| 4.3.2 การหดตัวเมื่อแห้ง                                            | 55 |
| 4.3.3 การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์เมื่อแห้ง                             | 60 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง                                             | 61 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง                                                 | 61 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ                                                     | 63 |

|                 | ญ<br>หน้า |
|-----------------|-----------|
| บรรณานุกรม      | 66        |
| ภาคผนวก         | 72        |
| ประวัติผู้เขียน | 97        |

## สารบัญตารางประกอบ

|                                                                                                                                    | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ 2.1 สารที่เป็นส่วนประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Neville, 1981) และตะกั่ว (United States และ Canada, 1978)            | 9    |
| ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความต้องการน้ำของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่ว                                                              | 38   |
| ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบสารประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และตะกั่ว                                                                      | 40   |
| ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และตะกั่ว                                                | 42   |
| ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาในการก่อตัวของปูนซีเมนต์ผสมตะกั่ว                                                | 43   |
| ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมตะกั่ว                                                                | 46   |
| ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมตะกั่ว                                                                | 49   |
| ตารางที่ 4.7 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่วภายหลังแช่กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 5                        | 52   |
| ตารางที่ 4.8 การสูญเสียกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่ว ภายหลังแช่กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อายุ 90 วัน | 54   |
| ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบการหดตัวเมื่อแห้งของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่ว                                                   | 56   |
| ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของการหดตัวเมื่อแห้งของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่ว                          | 58   |
| ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่ว                                                       | 60   |
| ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมตะกั่ว                                                                  | 62   |
| ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมตะกั่ว                                                          | 64   |

|                 |                                                                                                                                   |    |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ตารางภาคผนวก ก  | ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์<br>ผสมตะกรันเตาถลุง                                                            | 73 |
| ตารางภาคผนวก ข  | ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์<br>ผสมตะกรันเตาถลุง                                                       | 75 |
| ตารางภาคผนวก ค  | ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์<br>ผสมตะกรันเตาถลุง                                                       | 78 |
| ตารางภาคผนวก ง1 | ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ต<br>แลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงภายหลังแช่กรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 5                | 81 |
| ตารางภาคผนวก ง2 | ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์<br>ผสมตะกรันเตาถลุงภายหลังแช่กรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 5<br>ที่อายุ 90 วัน | 84 |
| ตารางภาคผนวก จ1 | ผลการทดสอบการหดตัวเมื่อแห้งของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์<br>ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุง                                                    | 87 |
| ตารางภาคผนวก จ2 | ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของการหดตัวเมื่อแห้ง<br>ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุง                            | 90 |
| ตารางภาคผนวก ฉ  | ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์<br>ผสมตะกรันเตาถลุงเมื่อแห้ง                                                | 93 |

## สารบัญภาพ

|                                                                                                                                                                           | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ภาพที่ 2.1 ส่วนต่าง ๆ ของเตาสูง                                                                                                                                           | 8    |
| ภาพที่ 2.2 ผลกระทบของปริมาณน้ำต่อค่ายุบตัวของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงและไม่ผสมตะกรันเตาถลุง ( Meusel และ Rose, 1983)                                                    | 11   |
| ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงใน ASTM C 989 เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ข้อมูลจากรายงานของ Task Group E-38.06.02) | 14   |
| ภาพที่ 2.4 อิทธิพลของการแทนที่ตะกรันเตาถลุงต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ (Hogan และ Meusel, 1981)                                                                          | 14   |
| ภาพที่ 2.5 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงและคอนกรีตที่ไม่ผสมตะกรันเตาถลุง (Hogan และ Meusel, 1981)                                                   | 15   |
| ภาพที่ 2.6 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุง $W/(C+S)=0.70$ ( Fernandez, Luiz และ Malhotar,V.Mohar, 1990 )                                                         | 16   |
| ภาพที่ 2.7 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุง $W/(C+S)=0.55$ ( Fernandez, Luiz และ Malhotar,V.Mohar, 1990 )                                                         | 16   |
| ภาพที่ 2.8 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุง $W/(C+S)=0.45$ ( Fernandez, Luiz และ Malhotar,V.Mohar, 1990 )                                                         | 17   |
| ภาพที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและความพรุนภายในเนื้อคอนกรีต (ชัชวาลย์, 2536)                                                               | 18   |
| ภาพที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านของน้ำกับอัตราส่วนของน้ำต่อสารซีเมนต์ (ชัชวาลย์, 2536)                                                                           | 19   |
| ภาพที่ 2.11 ความสามารถซึมผ่านของน้ำลดลงเมื่อปฏิกิริยาไฮเดรชันสมบูรณ์ขึ้น (ชัชวาลย์ , 2536 )                                                                               | 19   |
| ภาพที่ 2.12 การหดตัวเมื่อตากแห้ง (Drying Shrinkage) ของคอนกรีตไม่ผสมสารกระจายกักฟองอากาศสำหรับการแทนที่ด้วย Slag ต่าง ๆ กัน ( $W/C=.055$ ) ( Hogan และ Meusel, 1981)      | 23   |

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพที่ 3.1 เครื่องบดตะกั่วเตาถลุง                                                                                             | 28 |
| ภาพที่ 3.2 ขวดมาตรฐานเลอชาเตอลิเอร์ ( Le Chatelier )                                                                          | 29 |
| ภาพที่ 3.3 เครื่องแอร์เพอร์มิอ์อะบิลิตีของเบลน ( Air Permeability , Blaine )                                                  | 30 |
| ภาพที่ 3.4 เครื่องมือทดสอบแบบไวแคต                                                                                            | 32 |
| ภาพที่ 3.5 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด                                                                                         | 33 |
| ภาพที่ 3.6 เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงดึง                                                                                      | 34 |
| ภาพที่ 3.7 เครื่องมือวัดความยาว                                                                                               | 35 |
| ภาพที่ 4.1 ผลการทดสอบระยะเวลาในการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์<br>ผสมตะกั่วเตาถลุง                                           | 44 |
| ภาพที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์<br>ผสมตะกั่วเตาถลุง                                        | 47 |
| ภาพที่ 4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์<br>ผสมตะกั่วเตาถลุง                                        | 50 |
| ภาพที่ 4.4 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์<br>ผสมตะกั่วเตาถลุงภายหลังแช่กรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 5 | 53 |
| ภาพที่ 4.5 ผลการทดสอบการหดตัวเมื่อแห้งของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์<br>ผสมตะกั่วเตาถลุง                                     | 57 |
| ภาพที่ 4.6 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์<br>ผสมตะกั่วเตาถลุง                                 | 59 |