

## สารบัญ

### หน้า

|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| สารบัญ                                                         | (1) |
| สารบัญตาราง                                                    | (3) |
| สารบัญภาพ                                                      | (7) |
| คำนำ                                                           | 1   |
| วัตถุประสงค์                                                   | 3   |
| ขอบเขตการศึกษา                                                 | 3   |
| การตรวจเอกสาร                                                  | 4   |
| การเสื่อมสภาพและความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีต                 | 4   |
| วัสดุซ่อมคอนกรีต                                               | 5   |
| วัสดุปอชโซลาน                                                  | 6   |
| ดินขาว                                                         | 7   |
| ผลกระทบของดินขาวต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าและคอนกรีต  | 12  |
| เถ้าลอย                                                        | 17  |
| ผลกระทบของเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าและคอนกรีต | 18  |
| การใช้ดินขาวร่วมกับเถ้าลอย                                     | 24  |
| อุปกรณ์และวิธีการ                                              | 28  |
| วัสดุและอุปกรณ์                                                | 28  |
| วิธีการ                                                        | 30  |
| ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง                                         | 36  |
| การศึกษาเบื้องต้น                                              | 36  |
| คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอย                    | 41  |
| คุณสมบัติของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอย                         | 58  |
| คุณสมบัติของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยในสภาพสด                 | 60  |
| คุณสมบัติของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยในสภาพแข็งตัว            | 65  |

## สารบัญ (ต่อ)

|                                          | หน้า |
|------------------------------------------|------|
| สรุปและข้อเสนอแนะ                        | 84   |
| สรุป                                     | 84   |
| ข้อเสนอแนะ                               | 87   |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง                     | 88   |
| ภาคผนวก                                  | 97   |
| ภาคผนวก ก ผลการทดลอง                     | 98   |
| ภาคผนวก ข วิธีการทดสอบและเครื่องมือทดสอบ | 152  |
| ภาคผนวก ค การทดลองส่วนเพิ่มเติม          | 159  |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่                                                                                               | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 อัตราส่วนผสมสำหรับคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย                                                         | 32   |
| 2 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุดินขาวผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ                                             | 38   |
| 3 ความละเอียดของวัสดุดินขาวผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ โดยการบดด้วยเครื่อง Ball Mill                   | 39   |
| 4 ความละเอียดของวัสดุดินขาวผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ โดยการบดด้วยเครื่อง los Angeles                 | 39   |
| 5 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ดินขาวและเถ้าลอย                                                      | 40   |
| 6 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวและเถ้าลอยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C618                                  | 41   |
| 7 กำลังอัดและดัชนีกำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>กรณีบดแยกและบดรวม                           | 58   |
| 8 ปริมาณอากาศของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ                                           | 60   |
| 9 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ                                   | 61   |
| 10 อุณหภูมิสูงสุดที่เวลาต่าง ๆ หลังการผสมของคอนกรีต                                                    | 64   |
| 11 กำลังอัดของคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 7.5x7.5x7.5 ซม. ที่อายุทดสอบต่าง ๆ                                | 65   |
| 12 ตัวคูณปรับแก้ค่ากำลังอัดเทียบเท่าของคอนกรีตรูปทรงกระบอก                                             | 65   |
| 13 กำลังอัดเทียบเท่าทรงกระบอกของคอนกรีตที่อายุทดสอบต่าง ๆ                                              | 66   |
| 14 กำลังคัดของคอนกรีตที่อายุทดสอบต่าง ๆ                                                                | 68   |
| 15 น้ำหนักที่หายไปจากการซึ่ฝิวด้านบนของคอนกรีตแต่ละส่วนผสม                                             | 69   |
| 16 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตส่วนผสมต่าง ๆ ที่อายุทดสอบ 28 และ 56 วัน                   | 70   |
| 17 ปริมาณประจุไฟฟ้าและระดับความซึมผ่านของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C1202                                  | 71   |
| 18 การเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์และความน่าจะเป็นของการกัดกร่อนจากสนิมตาม<br>มาตรฐาน ASTM C876         | 73   |
| 19 ระยะเวลาทดสอบที่มีความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมมากกว่าร้อยละ 90<br>และเริ่มเห็นรอยแตกร้าว | 75   |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่                                                                                                                          | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 20 ระยะซึมลึกเฉลี่ยของคลอไรด์จากการฉีดพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด<br>ที่อายุทดสอบ 91 และ 140 วัน                                | 78   |
| 21 การจำแนกระดับความรุนแรงของการเกิดสนิมในเหล็กเสริม                                                                              | 82   |
| 22 การจำแนกระดับความรุนแรงของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตควบคุมและ<br>คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่ระยะเวลาทดสอบ 91 และ 140 วัน | 83   |
| <br>ตารางผนวกที่                                                                                                                  |      |
| ก1 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าและค่าการไหล                                                                                               | 99   |
| ก2 กำลังอัดมอร์ต้าส่วนผสมต่างๆที่อายุทดสอบ 7 วัน                                                                                  | 100  |
| ก3 กำลังอัดมอร์ต้าส่วนผสมต่างๆที่อายุทดสอบ 28 วัน                                                                                 | 101  |
| ก4 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตควบคุม                                                                                            | 102  |
| ก5 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0                                             | 102  |
| ก6 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5                                             | 103  |
| ก7 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10                                            | 103  |
| ก8 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 5:15                                             | 104  |
| ก9 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 0:20                                             | 104  |
| ก10 การพัฒนาอุณหภูมิของคอนกรีตส่วนผสมต่าง ๆ                                                                                       | 105  |
| ก11 กำลังอัดของคอนกรีตควบคุมรูปทรงกระบอกขนาด<br>เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ซม. สูง 15 ซม.                                               | 116  |
| ก12 กำลังอัดของคอนกรีตควบคุม                                                                                                      | 117  |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่                                                                    | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------|------|
| ก13 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0  | 118  |
| ก14 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5  | 119  |
| ก15 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 | 120  |
| ก16 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 5:15  | 121  |
| ก17 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 0:20  | 122  |
| ก18 กำลังค้ำของคอนกรีตควบคุม                                                    | 123  |
| ก19 กำลังค้ำของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0  | 124  |
| ก20 กำลังค้ำของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5  | 125  |
| ก21 กำลังค้ำของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 | 126  |
| ก22 กำลังค้ำของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 5:15  | 127  |
| ก23 กำลังค้ำของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 0:20  | 128  |
| ก24 ความต้านทานการขัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตควบคุม                                | 129  |
| ก25 ความต้านทานการขัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>อัตราส่วน 20:0 | 129  |
| ก26 ความต้านทานการขัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>อัตราส่วน 15:5 | 130  |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่                                                                                                                    | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ก27 ความต้านทานการขัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>อัตราส่วน 10:10                                                | 130  |
| ก28 ความต้านทานการขัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>อัตราส่วน 5:15                                                 | 131  |
| ก29 ความต้านทานการขัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>อัตราส่วน 0:20                                                 | 131  |
| ก30 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าตัวอย่างคอนกรีตควบคุม                                                                                | 132  |
| ก31 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าตัวอย่างคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน<br>ดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0                                 | 135  |
| ก32 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าตัวอย่างคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน<br>ดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5                                 | 138  |
| ก33 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าตัวอย่างคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน<br>ดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10                                | 141  |
| ก34 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าตัวอย่างคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน<br>ดินขาวต่อเถ้าลอย 5:15                                 | 144  |
| ก35 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าตัวอย่างคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน<br>ดินขาวต่อเถ้าลอย 0:20                                 | 147  |
| ก36 ผลการทดลองการซึมผ่านของคลอไรด์โดยวิธี Rapid Chloride Permeability Test<br>ของตัวอย่างคอนกรีตส่วนผสมต่างๆที่อายุทดสอบ 28 วัน | 150  |
| ก37 ผลการทดลองการซึมผ่านของคลอไรด์โดยวิธี Rapid Chloride Permeability Test<br>ของตัวอย่างคอนกรีตส่วนผสมต่างๆที่อายุทดสอบ 56 วัน | 151  |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่                                                                                                     | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 เครื่องมือทดสอบหาค่าความซึมผ่านของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C1202                                           | 34   |
| 2 กระบวนการเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมด้วยไฟฟ้า                                                            | 35   |
| 3 จำลองการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า (Half Cell Potential Test)                                                      | 35   |
| 4 ลักษณะดินขาวดิบ ดินขาวหลังการบด เถ้าลอย และดินขาวผสมเถ้าลอย<br>ที่อัตราส่วนต่าง ๆ                        | 37   |
| 5 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของอนุภาคดินขาวและอนุภาคเถ้าลอย                                                       | 38   |
| 6 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ที่อายุ 3 วัน   | 42   |
| 7 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ที่อายุ 7 วัน   | 42   |
| 8 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ที่อายุ 14 วัน  | 43   |
| 9 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ที่อายุ 28 วัน  | 43   |
| 10 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ที่อายุ 91 วัน | 44   |
| 11 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้า 20:0 ที่อายุต่าง ๆ        | 45   |
| 12 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้า 10:10 ที่อายุต่าง ๆ       | 47   |
| 13 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอย<br>อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้า 0:20 ที่อายุต่าง ๆ        | 49   |
| 14 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่าง ๆ<br>ที่อายุ 1 วัน                     | 52   |
| 15 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่าง ๆ<br>ที่อายุ 3 วัน                     | 53   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่                                                                                                 | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 16 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่าง ๆ ที่อายุ 7 วัน                    | 54   |
| 17 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่าง ๆ ที่อายุ 14 วัน                   | 55   |
| 18 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่าง ๆ ที่อายุ 28 วัน                   | 56   |
| 19 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่าง ๆ ที่อายุ 91 วัน                   | 57   |
| 20 กำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยบดแยกและบดรวมที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่อายุ 7 และ 28 วัน           | 59   |
| 21 การทดสอบค่าการยุบตัวโดยควบคุมค่ายุบตัวที่ $7.5 \pm 2.5$ ซม.                                         | 60   |
| 22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายุบตัวสัมพัทธ์กับเวลา                                                         | 62   |
| 23 เครื่องมือสำหรับบันทึกอุณหภูมิและการติดตั้งเทอร์โมคอปเปิ้ลในตัวอย่างคอนกรีต                         | 63   |
| 24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยกับเวลา                                     | 64   |
| 25 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุทดสอบของคอนกรีตส่วนผสมต่าง ๆ                                | 67   |
| 26 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุทดสอบของคอนกรีตส่วนผสมต่าง ๆ                                | 68   |
| 27 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตแต่ละส่วนผสมที่อายุ 28 และ 56 วัน                          | 71   |
| 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะเวลาทดสอบ                                            | 73   |
| 29 การเกิดการแตกร้าวของคอนกรีตควบคุมที่อายุต่าง ๆ                                                      | 74   |
| 30 ตัวอย่างคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆที่อายุ 91 และ 140 วัน                           | 76   |
| 31 ตัวอย่างคอนกรีตแต่ละส่วนผสมที่พ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ในเตรค ที่อายุ 91 วัน                          | 77   |
| 32 ตัวอย่างคอนกรีตแต่ละส่วนผสมที่พ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ในเตรค ที่อายุ 140 วัน                         | 78   |
| 33 การวัดระดับความลึกการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตด้วยการฉีดพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ในเตรค ที่อายุ 91 วัน | 79   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่                                                                                                  | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 34 การวัดระดับความถี่การซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตด้วยการฉีดพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ที่อายุ 140 วัน | 80   |
| ภาพผนวกที่                                                                                              |      |
| ข1 เตาเผาไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง                                                                          | 153  |
| ข2 เครื่องบดวัสดุแบบ Ball Mill                                                                          | 153  |
| ข3 เครื่อง Los Angeles และ Rods สำหรับบดวัสดุ                                                           | 154  |
| ข4 การบ่มตัวอย่างทดสอบชนิดต่าง                                                                          | 154  |
| ข5 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าและกำลังคัดของคอนกรีต                                                      | 155  |
| ข6 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต                                                                           | 155  |
| ข7 ชุดอุปกรณ์การทดสอบความซึมผ่านของคลอไรด์ Rapid Chloride Permeability                                  | 156  |
| ข8 เครื่องมือทดสอบการขัดสีเทียบเท่ามาตรฐาน ASTM C944-90a                                                | 156  |
| ข9 ชุดอุปกรณ์เร่งการเกิดสนิมด้วยไฟฟ้า                                                                   | 157  |
| ข10 การเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมด้วยไฟฟ้า                                                             | 157  |
| ข11 ความเสียหายของแผ่นพื้นคอนกรีตในลักษณะต่าง ๆ                                                         | 158  |
| ค1 กำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยบดแยกและบดรวมที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน         | 161  |
| ค2 การประกอบชิ้นทดสอบแรงยึดเหนี่ยวกับชุดยึดจับ                                                          | 163  |
| ค3 การทดสอบแรงยึดเหนี่ยว                                                                                | 164  |
| ค4 การทดสอบ Ring Test                                                                                   | 165  |