

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
ขอบเขตการศึกษา.....	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
ปัญหาการแตกร้าว.....	7
กำลังรับแรงอัด.....	12
ปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอันเนื่องมาจาก การโจมตีของซัลเฟต (Sulfate Attack).....	16
ปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอันเนื่องมาจาก การกัดกร่อนโดยกรด (Acid Attack).....	20
ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume).....	22
นาโนซิลิกา.....	32
กรอบแนวคิดและสมมติฐานของงานวิจัย.....	33
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	36
วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	36
เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	46
รายละเอียดการทดสอบ.....	54
แผนการทำงาน.....	82

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการทดสอบ.....	85
การทดสอบคุณสมบัติของนาโนซิลิกา.....	85
การศึกษาค่าการไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ต้า.....	95
การศึกษาค่าระยะเวลาการก่อตัว.....	98
การศึกษาการซึมผ่านของอากาศ.....	101
การศึกษาการหดตัว.....	104
การศึกษาการต้านทานการทำลายจากกรดซัลฟูริกของซีเมนต์มอร์ต้า.....	108
การศึกษาการต้านทานการทำลายจากซัลเฟตของซีเมนต์มอร์ต้า.....	113
5 สรุปผลการทดสอบ.....	115
การศึกษาคือความเป็นปอซโซลานของนาโนซิลิกา.....	115
การศึกษาค่าการไหลแผ่.....	115
การศึกษาค่าระยะเวลาการก่อตัว.....	115
การศึกษาการหดตัว.....	116
การศึกษาการต้านทานการทำลายเนื่องจากกรดซัลฟูริก.....	116
การศึกษาการต้านทานการทำลายจากไฮเดียมซัลเฟต.....	116
บรรณานุกรม.....	118
ประวัติผู้วิจัย.....	123

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	38
2 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์	38
3 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์	39
4 คุณสมบัติของนาโนซิลิกาฟูม	40
5 ตารางแสดงเกณฑ์สมบัติของน้ำในการผสมคอนกรีต	42
6 ปริมาณสารที่ยอมให้มีได้ในน้ำผสมคอนกรีต	42
7 สรุปการทดสอบ	53
8 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง	70
9 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัส	71
10 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัด	74
11 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก	77
12 ส่วนผสมการทดสอบการต้านทานการทำลายจากไซเดียมซัลเฟตของ ซีเมนต์มอร์ต้า	79
13 สรุปการทดสอบของงานวิจัย	80
14 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด	81
15 แผนการดำเนินงาน	82
16 สรุปผลโดยรวมอิทธิพลของการใช้งานนาโนซิลิกาทั้งสองประเภท	117

สารบัญญภาพ

ภาพ	หน้า
1 ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	1
2 ภาพรวมของงานวิจัย	6
3 แรงกระทำที่ผิวของไฮเดรตซีเมนต์ในช่องว่างค้ำปิลลาในระดับไมโครเมตร ของโครงสร้างคอนกรีต	8
4 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการหดตัวแบบออโตจีนัส	9
5 อัตราการหดตัวแบบออโตจีนัส	9
6 ลักษณะรอยแตกเนื่องจากการหดตัวแบบออโตจีนัส	10
7 รอยแตกเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง.....	11
8 ตัวแปรที่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้ง	11
9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอัตราส่วนน้ำต่อ ปูนซีเมนต์โดยปริมาตร	13
10 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม.....	14
11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความพรุนของ ซีเมนต์เพสต์	15
12 ตัวอย่างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กถูกทำลายโดยซัลเฟต	16
13 ตัวอย่างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสน้ำเสีย	17
14 ตัวอย่างของโครงสร้างถูกกัดกร่อนโดยกรด	20
15 สภาพคอนกรีตถูกทำลายโดยกรด.....	21
16 ขั้นตอนการผลิตซิลิกาฟูม	23
17 ตัวอย่างซีเมนต์ (a) และตัวอย่างของอนุภาคซิลิกาฟูม (b)	24
18 ผลของซิลิกาฟูมต่อสมบัติของคอนกรีตสด.....	26
19 ภาพแสดงการเกิดการเยิ้มในคอนกรีต.....	27
20 ผลของการใช้งานซิลิกาฟูมต่อสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว.....	30
21 ตัวอย่างการใช้งานซิลิกาฟูมในงานคอนกรีตกำลังสูง.....	31
22 ขนาดของอนุภาคและพื้นผิวสัมผัสของวัสดุในงานคอนกรีต.....	32
23 ลักษณะไฮเดรตซีเมนต์ที่ถูกปรับปรุงด้วยวัสดุนาโนให้ไม่ชอบสัมผัสกับน้ำ	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
24 ภาพจำลองพื้นผิวไฮเดรตซีเมนต์ที่ถูกปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนซิลิกา ประเภทที่ไม่ชอบน้ำ.....	35
25 ปรัชญาการนำกลิ้งบนใบบอนซึ่งเป็นตัวอย่างของการสร้างความขรุขระระดับนาโน ซึ่งทำให้พื้นผิวมีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น (a) และแบบจำลองแนวคิด (Conceptual Model) ของการใช้วัสดุนาโนซึ่งถูกปรับปรุง (b)	35
26 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ปูนตราช้าง	37
27 การเก็บรักษาปูนซีเมนต์พลาสติกจำนวนสองชั้นก่อนเก็บบนชั้นวาง	37
28 ภาพแสดงตัวอย่างซิลิกาฟูม	40
29 ภาพแสดงตัวอย่างซิลิกาฟูมจากทั้ง 2 แหล่ง	41
30 น้ำสะอาดที่ปรับอุณหภูมิ 23 ± 1 องศาเซลเซียส.....	41
31 ตัวอย่างของมวลรวมละเอียด.....	43
32 การทดสอบหาสารอินทรีย์ในทราย.....	43
33 ลักษณะการฝั่งทรายในร่ม	44
34 การพลิกกลับทรายขณะปรับความชื้น.....	44
35 ตรวจสอบความชื้นอย่างรวดเร็ว.....	45
36 การเก็บทรายในถัง	45
37 การตรวจสอบความชื้นของทราย.....	46
38 ชุดผสมซีเมนต์	46
39 ชุดเครื่องมือโต๊ะเขย่าไล่ฟองอากาศ	47
40 แบบหล่อก้อนตัวอย่างขนาด $2.5 \times 2.5 \times 28.5$ เซนติเมตร.....	47
41 แบบหล่อก้อนตัวอย่างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10×20 เซนติเมตร.....	48
42 แบบหล่อก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด $15 \times 15 \times 15$ เซนติเมตร	48
43 แบบหล่อก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร	49
44 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 กรัม (a) และ 0.001 กรัม (b)	49
45 ชุดทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาว.....	50
46 ชุดทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัวซีเมนต์เฟสดี.....	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
47 ชุดทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัวซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีต.....	51
48 ชุดทดสอบกำลังรัดแรงอัดซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีต.....	52
49 ชุดทดสอบการซึมผ่านของอากาศ.....	53
50 ลักษณะนาโนซิลิกาประเภทที่ไม่ชอบน้ำลอยบนผิวน้ำ.....	54
51 ลักษณะการให้นาโนซิลิกาแขวนลอยในน้ำด้วยการหมุนด้วยเครื่องหมุน.....	55
52 ลักษณะการแขวนลอยของนาโนซิลิกาประเภทที่ไม่ชอบน้ำ.....	55
53 การเติมสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์.....	56
54 ตัวอย่างการทดสอบวัดประจุไฟฟ้า	57
55 ชุดเครื่องมือไอแคต	58
56 การทดสอบหาค่าการก่อตัวเริ่มต้น.....	58
57 เข็มการหาเวลาการก่อตัวขั้นสุดท้าย.....	59
58 ตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าในแบบเทก่อนการทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัว	60
59 การไล่ฟองอากาศด้วยโต๊ะเขย่าไล่ฟองอากาศ	60
60 การทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัว.....	61
61 กราฟแสดงวิธีการหาค่าการก่อตัวของคอนกรีต	62
62 การเตรียมวัสดุก่อนทำการผสม.....	63
63 ขั้นตอนการผสมซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์มอร์ต้า.....	63
64 ลักษณะการเทซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์มอร์ต้าลงในแบบ.....	64
65 ตัวอย่างการถอดแบบซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้า.....	65
66 การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวและการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก	65
67 การเตรียมก้อนตัวอย่างทดสอบการหดตัวแบบออโรโตจีนัส	66
68 การเตรียมก้อนตัวอย่าง	67
69 การวัดค่าการยึดหดและการชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่างทดสอบ	67
70 ชั้นวางตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีต.....	68
71 ตัวอย่างอุปกรณ์ทดสอบอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
72 กราฟแสดงการตรวจสอบความอุดมภูมิของห้องเก็บตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีต	69
73 กราฟแสดงผลการตรวจสอบความชื้นในห้องเก็บตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีต	69
74 ตัวอย่างก้อนซีเมนต์มอร์ต้าขนาด 5*5*5 เซนติเมตรสำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด	72
75 การทดสอบกำลังอัด	73
76 ตัวอย่างคอนกรีตถูกกักกร่อนโดยกรด	75
77 ซีเมนต์มอร์ต้าหลัก (OPC) ที่กำลังขยาย a) 50x, b) 2500x และ c) 5000x เท่า	86
78 ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิกาประเภทที่ชอบน้ำ (HI) ร้อยละ 2 ที่กำลังขยาย a) 50x, b) 2500x, c) 5000x, d) 10000x ตามลำดับ (ผสมแบบผง)	87
79 ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิกาประเภทที่ชอบน้ำ (HI) ร้อยละ 1 ที่กำลังขยาย a) 50x, b) 2500x, c) 5000x, d) 10000x ตามลำดับ (ผสมแบบแขวนลอยความเข้มข้น 29 g/l)	88
80 ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิกาประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ร้อยละ 2 ที่กำลังขยาย a) 50x, b) 2500x, c) 5000x ตามลำดับ (ผสมแบบผง)	89
81 ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิกาประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ร้อยละ 1 ที่กำลังขยาย a) 50x, b) 2500x, c) 5000x, d) 10000x ตามลำดับ (ผสมแบบแขวนลอย)	90
82 การสูญเสียประจุทางไฟฟ้าของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaO ₂) ในระบบ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก	92
83 ดัชนีการพัฒนากำลังของซีเมนต์มอร์ต้า (ผสมแบบผงนาโนซิลิกา) อัตราน้ำต่อ วัสดุประสาน 0.55ปมด้วยน้ำที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์	94
84 ดัชนีการพัฒนากำลังของซีเมนต์มอร์ต้า	95
85 ผลการทดสอบค่าการไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ต้า	97

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
86 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ แต่ละส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาประเภทที่ชอบน้ำ และประเภทที่ไม่ชอบน้ำ ร้อยละ 0.5, 1 และ 2 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ร้อยละ (w/b) 0.35.....	99
87 ค่าการก่อตัวของซีเมนต์มอร์ต้า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) 0.55 อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:1.55.....	101
88 ความพรุนของซีเมนต์มอร์ต้า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 (การใช้งานแบบผึ่ง) ทดสอบที่ตัวอย่างอายุ 60	103
89 ความพรุนของซีเมนต์มอร์ต้า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 (ทำให้แขวนลอยก่อนนำไป) ทดสอบที่ตัวอย่างอายุ 60 วัน.....	103
90 ความพรุนของซีเมนต์มอร์ต้า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ทดสอบที่ ตัวอย่างอายุ 60 วัน	104
91 ผลการทดสอบการหดตัวแบบออร์โตจีนัส อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 การแทนที่ด้วยนาโนซิลิกาทั้งสองประเภทร้อยละ 0, 0.5, 1 และ 2 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ควบคุมอุณหภูมิ 28±1 องศาเซลเซียส ความชื้น 50±5 %RH.....	105
92 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการหดตัวและการอายุของซีเมนต์มอร์ต้า (การผสมแบบผึ่ง) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.55	107
93 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ของการหดตัวและการสูญเสียน้ำหนักของ ซีเมนต์มอร์ต้า (การผสมแบบทั่วไป) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.55.....	108
94 การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ต้าเนื่องจากกรดซัลฟูริกที่มีการแทนที่ ด้วยนาโนซิลิกาประเภทพื้นผิวชอบน้ำและไม่ชอบน้ำร้อยละ 0.5, 1 และ 2 (ผสมแบบผึ่ง) ทดสอบใช้สารละลายซัลฟูริกความเข้มข้น 3%	111
95 การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ต้าเนื่องจากกรดซัลฟูริกที่มีการแทนที่ ด้วยนาโนซิลิกาประเภทพื้นผิวชอบน้ำและไม่ชอบน้ำร้อยละ 14.5, 29 g/l (เท่ากับร้อยละ 0.5, 1 ผสมแบบแช่ในน้ำ) ทดสอบใช้สารละลายซัลฟูริ ความเข้มข้น 3%	111

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ

หน้า

- 96 การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ต้าเนื่องจากกรดซัลฟูริกที่มีการแทนที่
ด้วยนาโนซิลิกาประเภทพื้นผิวชอบน้ำและไม่ชอบน้ำร้อยละ 0.5, 1 และ 2
(ผสมแบบผง) ทดสอบใช้สารละลายซัลฟูริกความเข้มข้น 5% 112
- 97 การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ต้าเนื่องจากกรดซัลฟูริกที่มีการแทนที่
ด้วยนาโนซิลิกาประเภทพื้นผิวชอบน้ำและไม่ชอบน้ำร้อยละ 14.5, 29 g/l
(เท่ากับร้อยละ 0.5, 1 ผสมแบบแขวนลอยในน้ำ) ทดสอบใช้สารละลายซัลฟูริ
ความเข้มข้น 5%..... 112
- 98 ค่าการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟต ของซีเมนต์มอร์ต้า..... 114