

สมบัติด้านความคงทนของมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

Durability Properties of Mortars and Concrete Containing Strength Enhancing Mineral Admixture

ปิติศานต์ กร้ามาต^{1*} ธนภฤต มณีรัตน์² ปานเทพ จุลนิพิฐวงษ์³
จินดารัตน์ มณีเจริญ⁴ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกกุล⁵

Pitisan Krammart^{1*} Tanakrit Maneerat² Parntep Julnipitawong³

Jindarat Maneecharoen⁴ Somnuk Tangtermsirikul⁵

pitisan.k@en.rmutt.ac.th^{1*}, zerotype07@gmail.com², parntep@siit.tu.ac.th³, jindarat.m@en.rmutt.ac.th⁴, somnuk@siit.tu.ac.th⁵

^{1,2,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

^{1,2,4} Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

³ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

³ Construction and Maintenance Technology Research Center, Sirindhorn International of Technology, Thammasat University

⁵ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

⁵ School of Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International of Technology, Thammasat University

Received: May 4, 2016
Revised: October 18, 2017
Accepted: January 30, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด (SA) โดยการเพิ่มเติมและโดยการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 5.5, 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) โดยศึกษาการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ ผลการศึกษา พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน ก่อนข้างชัดเจน ส่วนการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสม SA มีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน โดยเฉพาะเมื่อผสม SA ในปริมาณที่มากขึ้น และการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสม SA โดยการเพิ่มเติมมีแนวโน้มว่าน้อยกว่าของโดยการแทนที่ สำหรับการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตนั้น พบว่าของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่า ส่วนของคอนกรีตผสม SA โดยการเพิ่มเติมมีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของคอนกรีตผสม SA โดยการแทนที่กลับมีแนวโน้มมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของคอนกรีต OPC ล้วน และการเพิ่ม SA ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่มากขึ้น นอกจากนี้พบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และของคอนกรีตผสม SA (โดยเฉพาะเมื่อผสม SA ในปริมาณที่มากขึ้น) มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีต OPC ล้วน โดยความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสม SA โดยการเพิ่มเติมมีแนวโน้มว่าจะน้อยกว่าของโดยการแทนที่สุดท้ายการขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น พบว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วนของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และของมอร์ตาร์ผสม SA โดยการแทนที่ มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของมอร์ตาร์ผสม SA โดยการเพิ่มเติมมีค่าไม่แตกต่าง เมื่อเปรียบเทียบกับของมอร์ตาร์ OPC ล้วน และการผสม SA ในปริมาณที่ต่างกันให้ค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ไม่แตกต่างกัน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น พบว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และของมอร์ตาร์ผสม SA มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของมอร์ตาร์ OPC ล้วน และการผสม SA ในปริมาณที่ต่างกันให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: สารเพิ่มกำลังอัด, การหดตัวแบบแห้ง, ความสึกกร่อนคาร์บอนเนชั่น, ความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์, การต้านทานซัลเฟต

Abstract

This research was aimed to study the durability properties of concrete containing strength enhancing mineral admixture (SA). The SA was used to add and partial replacement of 5.5, 6.5 and 7.5% by weight in Portland cement type 1 (OPC). Dry shrinkage of mortar, carbonation of concrete, resistance to chloride penetration of concrete and sulfate resistance of mortar were considered. The study found that the drying shrinkage of mortar with fly ash was rather small when compared to that of OPC mortar. Also, drying shrinking of mortar containing SA was less than that of the OPC mortar, especially when mixed in greater quantities. The drying shrinkage of mortar contained SA addition was likely that less of mortar containing SA with partial replaced. Furthermore, the carbonation of concrete with fly ash was greater than that of OPC concrete. The carbonation of concrete contained SA addition was lesser than that of OPC concrete whereas the carbonation of concrete containing SA with partial replaced was higher. By adding SA was used in greater quantities, the carbonation of concrete had increased. In addition, the resistance to chloride penetration of concrete with fly ash and containing SA was better than that of OPC concrete. Moreover, the more SA was mixed, the better to resist the penetration of chloride occurred. The resistance to chloride penetration of concrete contained SA addition was lower than that of concrete containing SA with partial replaced. Finally, the expansions in sodium sulfate solution of type V cement mortar, mortar with fly ash and mortar containing SA with partial replacement were lesser than those of OPC mortar, while its expansion of mortar contained SA addition was no different to that of OPC mortar. The different of using SA quantity, the expansion in sodium sulfate solution of concrete was no different. The weight loss in magnesium sulfate solution of type V cement mortar and mortar containing SA was lesser than that of OPC mortar. While the weight loss of mortar with fly ash was greater than that of OPC mortar. The different of using SA quantity, the weight loss in magnesium sulfate solution of mortar was no different.

Keywords: strength enhancing mineral admixture, drying shrinkage, carbonation depth, chloride penetration resistance, sulfate resistance

1. บทนำ

โดยทั่วไปในอดีตการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีการกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตเป็นลักษณะเดียวกัน แม้ว่าสภาพแวดล้อมของโครงสร้างจะมีความแตกต่างกันทำให้โครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงมีอายุการใช้งานสั้น การนำคอนกรีตไปใช้ในงานก่อสร้างควรคำนึงถึงความคงทนของคอนกรีตและสภาวะแวดล้อมที่คอนกรีตจะต้องเผชิญ

ปัจจุบันการค้นคว้าวิจัยทางด้านวัสดุคอนกรีต นักวิจัยและวิศวกรมีความรู้ความเข้าใจมากขึ้น และได้มีงานวิจัยที่ระบุแนวทางการเลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสมกับสมรรถนะของคอนกรีต ทำให้มีผู้คิดค้น

สารสังเคราะห์ เพื่อช่วยปรับปรุงปฏิกิริยาในส่วนผสมปูนซีเมนต์ โดยสารที่สังเคราะห์จะทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมให้ได้มาซึ่งสารที่ก่อให้เกิดกำลังในคอนกรีตเพิ่มเติม มีนักวิจัยได้ทดลองแทนที่สารผสมเพิ่มกำลังอัดในคอนกรีต และพบว่าทำให้ปฏิกิริยาในช่วงอายุเริ่มแรกสามารถพัฒนากำลังไปได้ดี [1] ทำให้มีการประเมินกันว่า การแทนที่สารเพิ่มกำลังอัดจะช่วยทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไปทั้งในด้านของสมบัติเบื้องต้นและด้านความคงทน [2]

การศึกษารุ่นนี้เป็นการศึกษาถึงสมบัติของสารเพิ่มกำลังอัด รวมทั้งเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานสารเพิ่มกำลังอัดอย่างมีประสิทธิภาพ โดยได้ศึกษาถึงสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต

ได้แก่ การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดเพื่อนำผลงานวิจัยอันเป็นประโยชน์นี้ไปใช้พัฒนาเทคโนโลยีด้านวัสดุคอนกรีตต่อไป

2. รายละเอียดวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

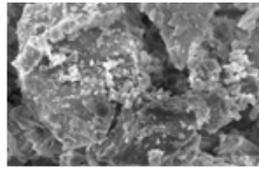
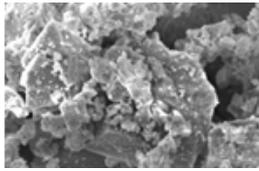
วัสดุประสานที่ใช้ได้แก่ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตามมาตรฐาน มอก.15-2555 [3] เถ้าลอยจาก อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง ตาม มอก. 2135-2545 [4] และสารเพิ่มกำลังอัด โดยตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เถ้าลอย และสารเพิ่มกำลังอัด ส่วนรูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,500 เท่า) ของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ พบว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 และสารเพิ่มกำลังอัดมีลักษณะเป็นเหลี่ยมผิวขรุขระ ขนาดไม่แน่นอนแตกต่างกันไป ในขณะที่อนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะเป็นทรงกลมและผิวค่อนข้างเรียบมีหลาย ๆ ขนาดปนกันอยู่เป็นจำนวนมาก

2.2 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์

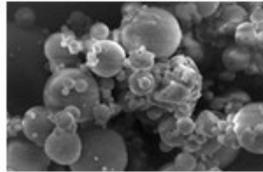
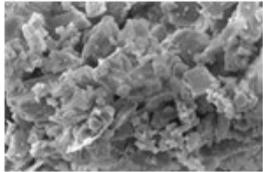
การทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ใช้ตัวอย่างขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 596-01 [5] โดยตัวอย่างมอร์ตาร์หลังจากถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมงนำตัวอย่างบ่มในน้ำเป็นเวลา 7 วัน แล้วบ่มในอากาศ เพื่อทดสอบการหดตัวแบบแห้งที่อายุ 1 3 5 7 14 21 28 42 56 และ 91 วัน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้

ร้อยละองค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ประเภท		เถ้าลอย	สารเพิ่มกำลังอัด
	ที่ 1	ที่ 5		
SiO ₂	18.93	21.69	37.61	1.94
Al ₂ O ₃	5.51	3.91	20.21	1.39
Fe ₂ O ₃	3.31	4.26	11.51	0.61
CaO	65.53	64.57	17.28	42.97
MgO	1.24	1.16	7.24	0.10
Na ₂ O	<0.01	<0.01	0.78	-
K ₂ O	0.31	0.21	2.46	-
SO ₃	2.88	2.03	2.28	49.50
LOI	2.24	1.62	0.48	2.68
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	3.15	2.38	2.95
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ชม. ² /ก.)	3,300	3,340	2,373	2,800



ก) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ข) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5



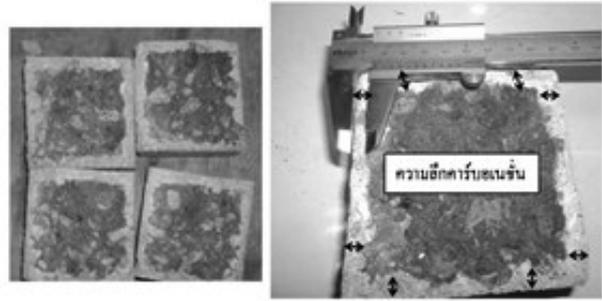
ค) สารเพิ่มกำลังอัด

ง) ใ้ล้าลอย

รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,500 เท่า) ของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้

2.3 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต

การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109-07 [6] และ ASTM C 856-04 [7] โดยตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x100x100 มิลลิเมตร หลังจากถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างบ่มในน้ำเป็นเวลา 7 และ 28 วัน หลังจากบ่มตามระยะเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างดังกล่าวไปอบในตู้อบการเกิดคาร์บอนเนชั่น (อุณหภูมิ $30\pm 5^{\circ}\text{C}$) โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกปล่อยออกมาในปริมาณ 40,000 ppm และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 50 ถึง 55 โดยระยะเวลาที่ตัวอย่างเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 วัน และ 56 วัน เมื่อครบอายุที่กำหนด นำไปทดสอบหาค่าความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่น โดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ซีก โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต จากนั้นฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) ที่ตัวอย่างซึ่งจะปรากฏเป็นสีม่วงในกรณีที่ไม่เกิดคาร์บอนเนชั่น แต่ในส่วนที่เกิดคาร์บอนเนชั่นตัวอย่างคอนกรีตจะไม่มีสี ใช้เวอร์เนียวัดค่าความลึกบริเวณที่ไม่เกิดสีม่วง (บริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชั่น) ทั้งหมด 8 ตำแหน่งต่อตัวอย่างแต่ละซีก ดังแสดงในรูปที่ 2 แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยค่าความลึกคาร์บอนเนชั่น



รูปที่ 2 การวัดความลึกคาร์บอนเนชั่น

2.4 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

สำหรับการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ (chloride penetration resistance) ของตัวอย่างคอนกรีต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 1202-12 [8] ด้วยชุดเครื่องมือทดสอบแบบเร่งให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน (รูปที่ 3) ใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรหนา 50 มิลลิเมตร โดยถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน ส่วนสารละลายที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ เมื่อครบอายุบ่ม 28 วัน นำตัวอย่างประกอบเข้ากับเซลล์ (Cell) โดยทำการเคลือบรอบๆ ผิวตัวอย่างด้วยกาวโพลียูรีเทน เมื่อกาวแห้งจึงเติมสารละลาย NaCl ลงในเซลล์ด้านซ้ายและเติมสารละลาย NaOH ลงในเซลล์ด้านขวามือ เมื่อเติมสารละลายแล้วนำประกอบเข้ากับชุดทดสอบดังรูปที่ 4 หลังจากนั้นปล่อยแรงดันไฟฟ้าขนาด 60 ± 0.1 โวลต์ผ่านชิ้นตัวอย่าง เครื่องมือจะทำการอ่านค่ากระแสไฟที่ผ่านตัวอย่างของแต่ละเซลล์ซึ่งจะทำการบันทึกค่าโดยอัตโนมัติทุก ๆ 30 นาที ใช้เวลาทดสอบ 6 ชั่วโมง โดยแสดงผลการทดสอบเป็นค่าประจุไฟฟ้าสะสมที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (Coulombs) ในการคำนวณค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ใช้ดังสมการที่ (1) นอกจากนี้ ASTM C 1202 ได้กำหนดระดับการแทรกซึมคลอไรด์จากผลการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า ดังตารางที่ 2

$$Q = 900(I_{30} + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

โดยที่ Q คือค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งตัวอย่าง คอนกรีตมีหน่วยเป็นคูลอมป์ (Coulomb) ส่วน I_0 คือแรงดันไฟฟ้าทันทีหลังจากที่เปิดแรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Amperes) ในขณะที่ I_t คือแรงดันไฟฟ้าแต่ละช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ มีหน่วยเป็นแอมแปร์

ตารางที่ 2 ระดับการแทรกซึมคลอไรด์ พิจารณาจากผลประจุไฟฟ้าการเคลื่อนผ่าน (ASTM C 1202)

จำนวนประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่าน (คูลอมป์)	ระดับการแทรกซึมคลอไรด์
มากกว่า 4,000	สูง
2,000 ถึง 4,000	ปานกลาง
1,000 ถึง 2,000	ต่ำ
100 ถึง 1,000	ต่ำมาก
น้อยกว่า 100	ไม่มีผล

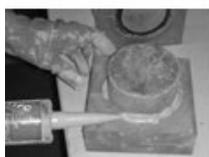


(ก) เซลล์



(ข) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 3 เครื่องมือทดสอบแบบแรงให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน



รูปที่ 4 การประกอบเซลล์เข้ากับชุดทดสอบแบบแรงให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน

2.5 การต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์

ในการศึกษาการต้านทานซัลเฟตในครั้งนี้ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยการประเมินใช้วัดการขยายตัวของตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

2.5.1 การขยายตัว

ในการทดสอบการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1012-04 [9] โดยใช้ตัวอย่างขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร หลังจากถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างแช่ในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 28 วัน เมื่อครบกำหนดทำการวัดความยาวเริ่มแรกด้วยเครื่องวัดความยาว แล้วนำตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (โดยใช้โซเดียมซัลเฟต 50 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร ซึ่งมีปริมาณ SO_4^{2-} เท่ากับ 33,800 ppm) โดยวัดการขยายตัวของตัวอย่างที่อายุ 2 4 8 และ 13 สัปดาห์ และทุกๆ 2 เดือน ของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

2.5.2 การสูญเสียน้ำหนัก

ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ในการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต หลังจากถอดแบบตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างแช่ในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 28 วัน เมื่ออายุครบ ทำการวัดน้ำหนักเริ่มแรกของตัวอย่าง แล้วนำตัวอย่างแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีปริมาณ SO_4^{2-} เท่ากับ 33,800 ppm (โดยใช้แมกนีเซียมซัลเฟต 42.36 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร) แล้ววัดค่าการสูญเสียน้ำหนักตัวอย่างที่อายุ 2 4 8 และ 13 สัปดาห์ และทุกๆ 2 เดือน ของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

2.6 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา

สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ แยกตามสมบัติด้านต่าง ๆ ที่ศึกษา ซึ่งได้แก่ การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ การเกิดคาร์บอนชั่นของคอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ แสดงดังตารางที่ 3 ถึง 5

การใช้สัญลักษณ์ของสัดส่วนผสมในการศึกษาเป็นดังนี้ CC1 หมายถึงคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน MC1 หมายถึงมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน MC5 หมายถึงมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน CC1 5.5Ad หมายถึงคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมโดยการเพิ่มเติม (Addition) สารเพิ่มกำลังอัด ร้อยละ 5.5 MC1 6.5Re หมายถึงมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมโดยการแทนที่ (Replacement) สารเพิ่มกำลังอัด ร้อยละ 6.5 และ MC1FA30 หมายถึงมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 เป็นต้น

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบแห้งและการต้านทานซัลเฟต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

ที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กรัม)					
		ปูนซีเมนต์ประเภท		เถ้าลอย	สารเพิ่มกำลังอัด	ทราย	น้ำ
		ที่ 1	ที่ 5				
1	MC1	1.00	-	-	-	2.75	0.55
2	MC5	-	1.00	-	-	2.75	0.55
3	MC1FA30	0.70	-	0.30	-	2.75	0.55
4	MC1 5.5Ad	1.00	-	-	0.055	2.75	0.55
5	MC1 6.5Ad	1.00	-	-	0.065	2.75	0.55
6	MC1 7.5Ad	1.00	-	-	0.075	2.75	0.55
7	MC1 5.5Re	0.95	-	-	0.055	2.75	0.55
8	MC1 6.5Re	0.94	-	-	0.065	2.75	0.55
9	MC1 7.5Re	0.93	-	-	0.075	2.75	0.55

ตารางที่ 4 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนชั่น โดยใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

ที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนักของคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)					
		ปูนซีเมนต์ประเภท 1	เถ้าลอย	สารเพิ่มกำลังอัด	ทราย	หิน	น้ำ
1	CC1	393	-	-	727	1047	196
2	CC1FA30	275	118	-	727	1047	196
3	CC1 5.5Ad	393	-	22	727	1047	196
4	CC1 6.5Ad	393	-	26	727	1047	196
5	CC1 7.5Ad	393	-	30	727	1047	196
6	CC1 5.5Re	372	-	22	727	1047	196
7	CC1 6.5Re	368	-	26	727	1047	196
8	CC1 7.5Re	364	-	30	727	1047	196

ตารางที่ 5 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ โดยใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30

ที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนักของคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)						
		ปูนซีเมนต์ประเภท 1	เถ้าลอย	สารเพิ่มกำลังอัด	ทราย	หิน	น้ำ	สารลดน้ำ
1	CC1	520	-	-	727	1047	151	5.2
2	CC1FA30	364	156	-	727	1047	151	5.2
3	CC1 5.5Ad	520	-	29	727	1047	151	5.2
4	CC1 6.5Ad	520	-	34	727	1047	151	5.2
5	CC1 7.5Ad	520	-	39	727	1047	151	5.2
6	CC1 5.5Re	491	-	29	727	1047	151	5.2
7	CC1 6.5Re	486	-	34	727	1047	151	5.2
8	CC1 7.5Re	481	-	39	727	1047	151	5.2

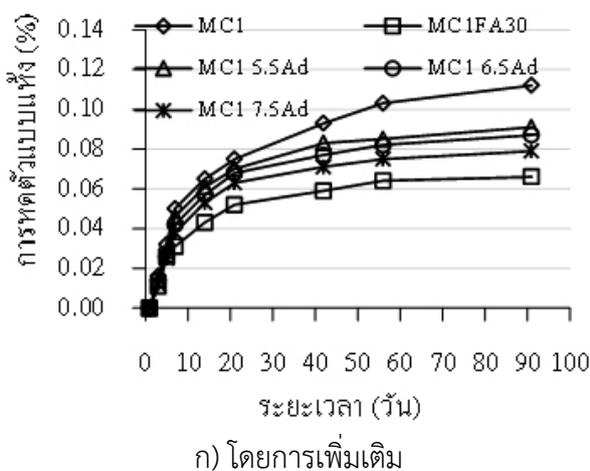
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์

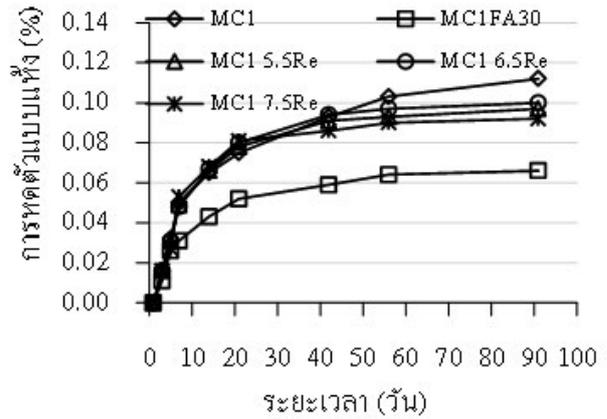
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยในส่วนมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด มีการผสมใน 2 ลักษณะคือ ผสมโดยการเพิ่มเติม (Addition) และผสมโดยการแทนที่ (Replacement) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 30) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ค่อนข้างชัดเจน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยทำให้มอร์ตาร์แน่นขึ้น การสูญเสียความชื้นจึงเป็นไปได้ยากขึ้น ส่งผลให้การหดตัวมีค่าลดลง ส่วนการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสม

สารเพิ่มกำลังอัดทั้งโดยการเพิ่มเติมและโดยการแทนที่มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดเข้าไปทำปฏิกิริยาเกิดเป็นตัวประสานทำให้เพสต์มีความแน่นมากขึ้น ช่วยให้โครงสร้างของเพสต์มีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้การสูญเสียความชื้นยากขึ้น รวมทั้งโครงสร้างเพสต์ด้านการหดตัวได้มากขึ้น จึงส่งผลให้การหดตัวแบบแห้งมีค่าน้อยลง โดยเฉพาะเมื่อผสมในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะปริมาณที่มากขึ้นของสารเพิ่มกำลังอัด ช่วยทำให้โครงสร้างของเพสต์มีความแน่นและแข็งแรงมากขึ้น และถ้าเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดระหว่างโดยการเพิ่มเติมกับการแทนที่ จะสังเกตว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์โดยการเพิ่มเติมมีแนวโน้มว่าน้อยกว่าของการแทนที่ ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าการเพิ่มเติมนั้นมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) น้อยลง (ใช้น้ำเท่าเดิม) ส่งผลให้มอร์ตาร์มีความแน่นมากกว่า การหดตัวจึงน้อยกว่า

รูปที่ 6 แสดงการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด (ทั้งโดยการเพิ่มเติมและโดยการแทนที่) ที่อายุ 91 วัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนถึงค่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

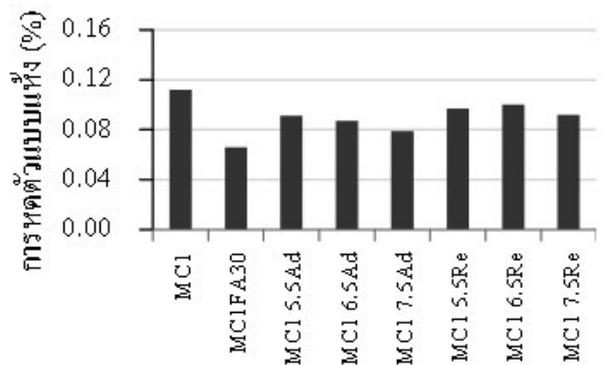


ก) โดยการเพิ่มเติม



ข) โดยการแทนที่

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์

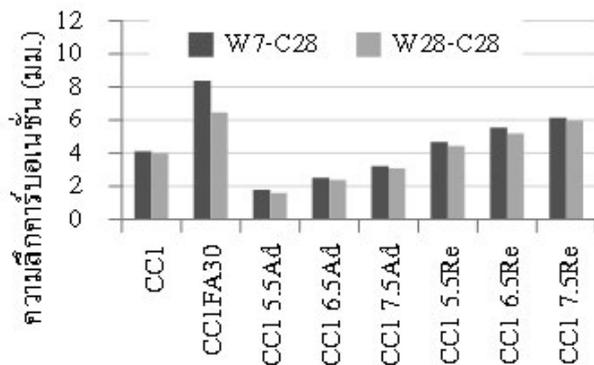


รูปที่ 6 การหดตัวแบบแห้งของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อายุ 91 วัน

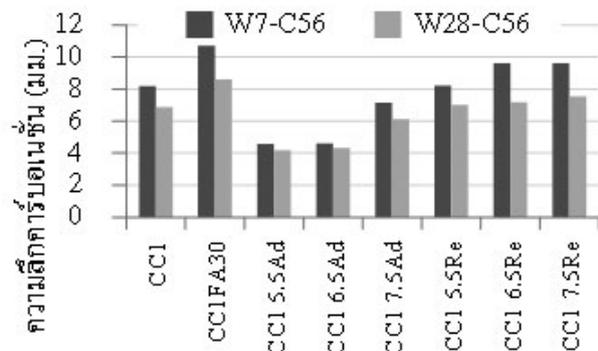
3.2 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต

รูปที่ 7 แสดงการเกิดคาร์บอนชั้นของตัวอย่างคอนกรีต เมื่อตัวอย่างบ่มในน้ำ 7 และ 28 วัน โดยรูปที่ 7ก) กรณีตัวอย่างเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน ส่วนรูปที่ 7ข) กรณีตัวอย่างเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 56 วัน พบว่าการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่เถ้าลอยซึ่งเป็นสารปอซโซลานไปลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ส่งผลให้คาร์บอนชั้นเกิดขึ้นเร็วขึ้น ส่วนการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการเพิ่มเติม มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็น

เพราะสารเพิ่มกำลังอัดจะช่วยทำให้โครงสร้างเพสต์มีความแน่นมากขึ้น ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปได้ยากขึ้น จึงทำให้เกิดคาร์บอนชั้นน้อยลง อย่างไรก็ตามการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการแทนที่ กลับมีแนวโน้มมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ผงเคมีผสมเพิ่มเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง จึงไปลด Ca(OH)_2 ส่งผลให้คาร์บอนชั้นเกิดมากขึ้น และทั้งนี้โดยการเพิ่มเติมและโดยการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้การเกิดคาร์บอนชั้นมากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเพิ่มขึ้นของสารเพิ่มกำลังอัด ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยลง (ใช้น้ำเท่าเดิม) ส่งผลให้ความเป็นต่างลดลง การเกิดคาร์บอนชั้นจึงมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต (ทั้งที่สัมผัสก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ 28 และ 56 วัน) ที่บ่มในน้ำ 7 วันมีมากกว่าของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วัน ก่อนสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งนี้เพราะการบ่มตัวอย่างคอนกรีตที่นานกว่า ทำให้ตัวอย่างมีความชื้นมากกว่าของตัวอย่างที่บ่มน้อยกว่า ส่งผลให้การเกิดคาร์บอนชั้นที่น้อยกว่า



ก) เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน



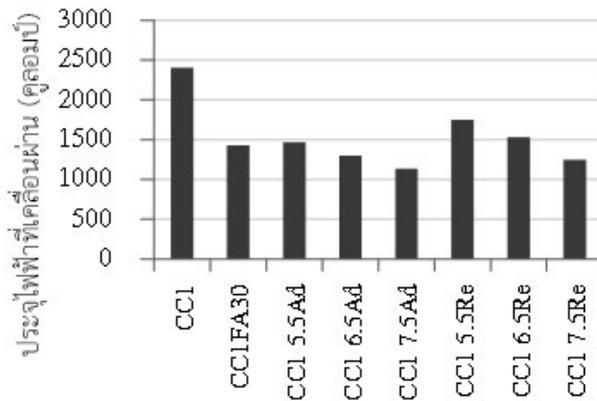
ข) เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 56 วัน

รูปที่ 7 การเกิดคาร์บอนชั้นของตัวอย่างคอนกรีต โดยตัวอย่างบ่มในน้ำที่ 7 และ 28 วัน

3.3 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

รูปที่ 8 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้า (คูลอมป์) ที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีต พบว่า ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 30) และของตัวอย่างคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด (ทั้งนี้โดยการเพิ่มเติมและโดยการแทนที่ ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยในกรณีเถ้าลอยนั้น เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานและเถ้าลอยที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาช่วยในการเติมเต็มช่องว่างในเพสต์ จึงทำให้คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น ส่วนสารเพิ่มกำลังอัดนั้นเข้าไปทำปฏิกิริยาเกิดเป็นตัวประสานทำให้เพสต์มีความแน่นมากขึ้น และช่วยให้โครงสร้างของคอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านยากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อผสมสารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะปริมาณที่มากขึ้นของสารเพิ่มกำลังอัด ช่วยทำให้โครงสร้างของคอนกรีตมีความแน่นและแข็งแรงมากขึ้น ทำให้สามารถมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้สูงขึ้น และถ้าเปรียบเทียบคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดระหว่าง การเพิ่มเติมกับโดยการแทนที่นั้น สังเกตได้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการเพิ่มเติมมีแนวโน้มว่าจะน้อยกว่า

ของโดยการแทนที่ ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าโดยการเพิ่มเติม ไม่มีการลดปริมาณปูนซีเมนต์ ซึ่งส่งผลให้การประสานของเพสต์ได้ดีกว่าของโดยการแทนที่ซึ่งเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง



รูปที่ 8 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีต

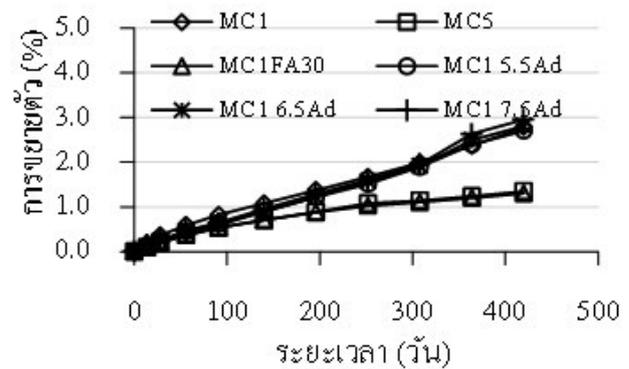
3.4 ความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์

3.4.1 การขยายตัว

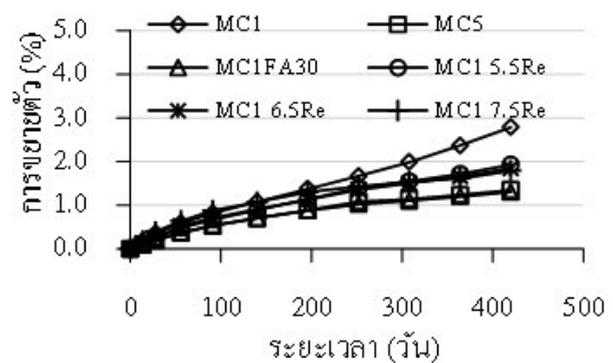
รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ พบว่า การขยายตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงทำให้เกิดปริมาณยิปซั่มและ Ettringite น้อยกว่า ส่วนการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 30) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ รวมทั้งการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงจึงเป็นการลดปริมาณ C_3A ส่วนการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการเพิ่มเติม ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 มีค่าไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (รูปที่ 9ก) ในขณะที่การขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการแทนที่ ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5

มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (รูปที่ 9ข) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัดเป็นการลดปริมาณ C_3A ลง จึงทำให้เกิด Ettringite น้อยลง ส่งผลให้การขยายตัวน้อยลง นอกจากนี้การผสมปริมาณของสารเพิ่มกำลังอัดที่ต่างกัน ให้ค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ไม่แตกต่างกัน

ส่วนรูปที่ 10 แสดงค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด (ทั้งโดยการเพิ่มเติมและโดยการแทนที่) ที่อายุ 420 วัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนถึงค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

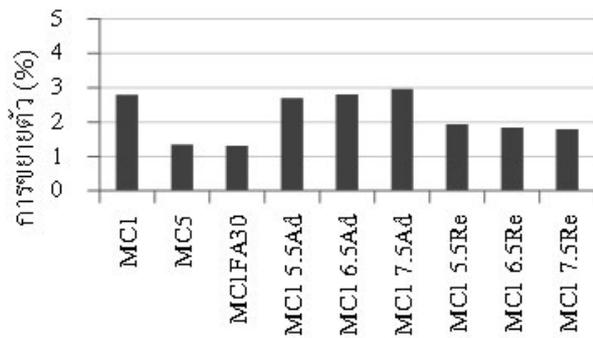


ก) โดยการเพิ่มเติม

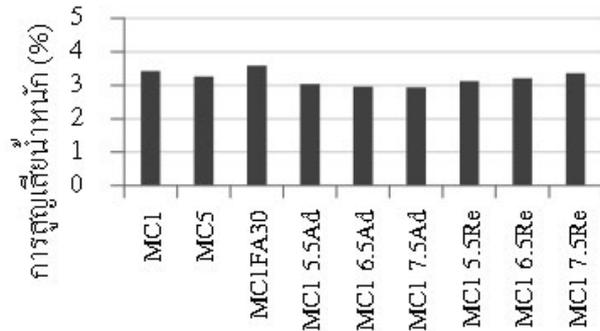


ข) โดยการแทนที่

รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



รูปที่ 10 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซิลเฟต ที่อายุ 420 วัน



รูปที่ 11 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟต ที่อายุ 420 วัน

3.4.2 การสูญเสียน้ำหนัก

รูปที่ 11 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟตที่อายุ 420 วัน พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะปริมาณ C_3A ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 30) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ความเป็นต่างในมอร์ตาร์ลดลง ($Ca(OH)_2$) ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้น จึงทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรตเปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน [10] ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดทั้งโดยการเพิ่มเติมและโดยการแทนที่ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดช่วยเพิ่มความสามารถในการประสานในเพสต์ จึงทำให้สารละลายซิลเฟตเข้าไปทำลายได้ยากขึ้นส่วนการผสมสารเพิ่มกำลังอัดที่ต่างกันให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใกล้เคียงกัน

4. สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การหดรัดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ค่อนข้างชัดเจน ส่วนการหดรัดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อผสมในปริมาณที่มากขึ้น โดยการหดรัดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการเพิ่มเติมมีแนวโน้มว่าน้อยกว่าของโดยการแทนที่
- 2) การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่า ส่วนการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการเพิ่มเติมมีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการแทนที่กลับมีแนวโน้มมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยการผสมสารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่มากขึ้น
- 3) ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด (โดยเฉพาะเมื่อผสมสารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากขึ้น) มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด โดยการเพิ่มเติมมีแนวโน้มว่าจะน้อยกว่าของโดยการแทนที่

4) ในสารละลายโซเดียมซิลเฟตนั้น การขยายตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการแทนที่มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการเพิ่มเติมมีค่าไม่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยการผสมสารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่ต่างกัน ให้ค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ไม่แตกต่างกัน

5) ในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟตนั้น การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และของมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และการผสมปริมาณของสารเพิ่มกำลังอัดที่ต่างกันให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ใกล้เคียงกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

9. เอกสารอ้างอิง

[1] Julnipitawong P, Tangtermsirikul S. Investigation on Performance of Concrete and Mortar Using Active Chemical Compound Rockfil-HSM. Final Report Submission to BKG Group Corporation. 2013.

[2] Julnipitawong P, Tangtermsirikul S. A Study on Effect of Strength Accelerating Compound on Properties of Concrete and Mortar. volume 2, No. 1, January – June 2014; pp. 17-29.

[3] Thai Industrial Standard. TIS 15-2555; Portland Cement Part 1 Specification. Ministry of Industry. Bangkok. 2012. (in Thai)

[4] Thai Industrial Standard. TIS 2135-2545; Coal Fly Ash for Use as an Admixture in Concrete. Ministry of Industry. Bangkok. 2002. (in Thai)

[5] American Society for Testing and Materials. ASTM C 596 - 01: Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement. Annual Book of ASTM Standards. 2001.

[6] American Society for Testing and Materials. ASTM C 109 - 07: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). Annual Book of ASTM Standards. 2007.

[7] American Society for Testing and Materials. ASTM C 856 - 04: Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete. Annual Book of ASTM Standards. 2004.

- [8] American Society for Testing and Materials. ASTM C 1202 - 12: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Annual Book of ASTM Standards. 2012.
- [9] American Society for Testing and Materials. ASTM C 1012 - 04: Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. Annual Book of ASTM Standards. 2004.
- [10] Al-Amoudi, O. S. B.. Mechanisms of Sulfate Attack in Plain and Blended Cement: a Review. Proceeding of the International Seminar. September 1999. University of Dundee, Scotland, UK. pp. 247-260.