View metadata, citation and similar papers at core.ac.uk
brought to you by CORE

ผลกระทบของการเติมแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอยต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายซัลเฟต

พร้อมพงศ์ ฉลาดธัญญกิจ[1,*] ปิติศานต์ กร้ำมาตร[2] กฤติยา แก้วมณี[3] และ สมนึก ตั้งเติมสิริกุล[4]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลกระทบของแคลเซียมออกไซด์อิสระ (Free CaO) ในเถ้าลอย ต่อการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน (แทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1) โดยใช้เถ้าลอยตั้งต้นที่เติมแคลเซียมออกไซด์อิสระให้มีปริมาณแตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่ามากกว่าประเภทที่ 5 ล้วน ขณะที่การขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูน (ขนาด 3 ไมโครเมตร) ร้อยละ 10 มีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และพบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอย หรือเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนจะมีค่าการขยายตัวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย กล่าวคือถ้าเถ้าลอยมีปริมาณ CaO ต่ำ ไม่ว่าปริมาณการแทนที่สูงหรือต่ำจะมีแนวโน้มให้ค่าการขยายตัวที่น้อย ในขณะที่เถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูง ถ้าแทนในปริมาณที่ต่ำจะให้ค่าการขยายตัวที่มาก แต่ถ้าแทนที่ในปริมาณสูงกลับให้ค่าการขยายตัวน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่แทนที่ ส่วนในกรณีสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วนมีค่ามากกว่าทั้งของมอร์ต้าร์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูน ขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 20 และร้อยละ 40) นั้ มีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วน ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน พบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์น้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน สุดท้ายพบว่าปริมาณ Free CaO ที่ต่างกันในเถ้าลอยไม่มีผลกระทบต่อค่าการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต

คำสำคัญ : แคลเซียมออกไซด์อิสระ, เถ้าลอย, ผงหินปูน, ซัลเฟต
(การประชุมวิชาการการวิจัยภาคปฏิบัติและการพัฒนา ครั้งที่ 1 เชียงใหม่)

---

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

[2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

[3] ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

[4] ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา และศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

[*] ผู้ติดต่อ, อีเมล์: chalattunyakij@gmail.com รับเมื่อ 1 สิงหาคม 2554 ตอบรับเมื่อ 7 ธันวาคม 2554

Effect of Addition of Free Lime in Fly Ash on Expansion and Weight Loss in Sulfate Solution of Mortar with Fly Ash and Limestone Powder

Prompong Chalattunyakij[1,*] Pitisan Krammart[2] Krittiya Kaewmanee[3] and Somnuk Tangtermsirikul[4]

Abstract

This research was aimed to study the effect of free lime (Free CaO) content in fly ash on expansion and weight loss of cement mortars, fly ash and limestone powder submerged in sulfate solutions. Free lime was added to the original fly ash in order to vary free lime content of fly ash. Test results revealed that the expansion of type I cement mortar was higher than that of type V cement mortar in sodium sulfate solution. It was also found that the expansion of mixture with 10% replacement of limestone powder was about the same as that of type V mixture. The expansion of binary mixtures with fly ash and ternary mixtures with cement, fly ash and limestone powder depended very much on the content and type of fly ash such that mixtures with low or higher replacement ratio of low CaO fly ash yielded low expansion. In case of high CaO fly ash, the expansion of mortar with higher fly ash content was lower than the mortar with high fly ash content. In magnesium sulfate solution, weight loss of type I cement mortar was higher than those of type V cement mortar and mortar with limestone powder. Weight loss of mortars with 20% and 40% fly ash were higher than those of type I and type V cement mortars. Ternary mixture incorporating cement, fly ash and limestone powder showed lower weight loss than type I cement mixture and was similar to type V cement mixture. Free lime content of fly ash had no effect on the expansion and weight loss of mortar in sulfate solutions.

Keywords : Free lime, Fly ash, Limestone powder, Sulfate

(Selected from 1st Symposium on Hands-on Research and Development, Chiang Mai)

---

[1] Department of Civil and Environmental Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak.
Corresponding author, E-mail: chalattunyakij@gmail.com

[2] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi.

[3] Department of Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Rangsit Campus.

[4] Department of Civil Engineering and Technology and Construction and Maintenance Technology Research Center, Thammasat University, Rangsit Campus.

[*] Corresponding author, E-mail: chalattunyakij@gmail.com

1. บทนำ

สภาวะแวดล้อมที่มีสารซัลเฟตซึ่งอยู่ในรูปสารละลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) โดยเฉพาะโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) เป็นสาเหตุหนึ่งที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีต ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตไม่สามารถใช้งานได้ตามที่ออกแบบไว้

โดยทั่วไปการใช้เถ้าลอย (Fly Ash) แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในเพสต์ลดลง และยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตได้ดีขึ้น [1,2] ข้อเสียของเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของคอนกรีตคือ ทำให้ก่อตัวช้า และกำลังรับแรงในระยะต้นจะลดลง [3,4] จึงไม่นิยมใช้เถ้าลอยในงานที่ต้องการกำลังรับแรงในระยะต้น ในขณะที่การใช้ผงหินปูนซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อย (Inert Material) สามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างทำให้กำลังรับแรงในระยะต้นมีค่าเพิ่มขึ้น [5] อย่างไรก็ตามการใช้ผงหินปูนยังไม่แพร่หลาย ถึงแม้ว่าราคาจะถูกกว่าปูนซีเมนต์ก็ตาม

การพัฒนาวัสดุประสานร่วม ซึ่งได้แก่ ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน เป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ร่วมกัน เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติบางประการที่ดีกว่าการเลือกใช้เถ้าลอยหรือผงหินปูนเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ ประกอบกับปัจจุบันเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีแนวโน้มที่จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระ (Free lime, Free CaO) สูงขึ้น [6] ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของ Free CaO ในเถ้าลอยต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายซัลเฟต

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษานี้ใช้วัสดุประสานซึ่งประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก ใช้เถ้าลอย และผงหินปูน เป็นวัสดุเพิ่มแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สำหรับเถ้าลอยที่ทำการศึกษาใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ 2 ตัวอย่าง คือเถ้าลอยตัวอย่าง A และเถ้าลอยตัวอย่าง D เป็นเถ้าลอยตั้งต้น ซึ่งมีปริมาณ Free CaO เท่ากับร้อยละ 0.83 และร้อยละ 2.11 ตามลำดับ ส่วนเถ้าลอยตัวอย่าง B และ C เกิดจากการเติมแคลเซียมออกไซด์ลงในเถ้าลอยตั้งต้น A เพื่อให้ได้เถ้าลอยที่มีปริมาณ Free CaO เท่ากับ ร้อยละ 2.43 และร้อยละ 3.81 ตามลำดับ ในขณะที่เถ้าลอยตัวอย่าง E และ F เกิดจากการเติมแคลเซียมออกไซด์ลงในเถ้าลอยตั้งต้น D เพื่อให้ได้เถ้าลอยที่มีปริมาณ Free CaO เท่ากับร้อยละ 3.11 และร้อยละ 4.51 ตามลำดับ โดยรายละเอียดปริมาณ Free CaO และ SO_3 ในเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 1 โดยผงหินปูนที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคประมาณ 3 ไมโครเมตร ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคประมาณ 14 ไมโครเมตร ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าประมาณ 13 ไมโครเมตร และเถ้าลอยแม่เมาะตัวอย่าง A และตัวอย่าง D มีค่าประมาณ 20 และ 35 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนองค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระ (Free CaO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ในตัวอย่างเถ้าลอย

ตัวอย่างเถ้าลอย	Free CaO (%)	SO_3 (%)
A	0.83	1.86
B	2.43	1.86
C	3.81	1.86
D	2.11	5.08
E	3.11	5.08
F	4.51	5.08

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมี ความละเอียดและความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		เถ้าลอย A	เถ้าลอย D	ผงหินปูน
	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5			(3 ไมครอน)
SiO_2	19.62	20.98	41.54	32.96	0.46
Al_2O_3	5.18	3.79	21.98	17.24	0.06
Fe_2O_3	3.59	3.95	13.69	14.93	0.03
CaO	64.17	61.32	13.69	22.46	55.25
MgO	1.02	3.75	2.24	2.80	0.37
SO_3	2.71	2.76	1.86	5.08	< 0.01
Na_2O	0.02	0.02	1.16	1.04	< 0.01
K_2O	0.54	0.52	3.08	2.71	0.001
LOI	2.52	1.75	0.12	0.22	43.79
Free CaO	1.00	1.00	0.83	2.11	-
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ซม.^{2}/ก.)	3,350	3,830	2,390	1,705	12,160
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	3.18	2.08	2.40	2.78

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของวัสดุผงที่ใช้ทำมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับ	สัญลักษณ์ *	ปูนซีเมนต์ (% by weight)	เถ้าลอย (% by weight)	ผงหินปูน (% by weight)
1	MC	(Type1) 100	-	-
2	MC5	(Type5) 100	-	-
3	MC 10L	90	-	10
4	MC 20FA	80	20	-
5	MC 20FB	80	20	-
6	MC 20FC	80	20	-
7	MC 20FD	80	20	-
8	MC 20FE	80	20	-
9	MC 20FF	80	20	-
10	MC 10FA 10L	80	10	10
11	MC 10FB 10L	80	10	10
12	MC 10FC 10L	80	10	10
13	MC 10FD 10L	80	10	10
14	MC 10FE 10L	80	10	10
15	MC 10FF 10L	80	10	10
16	MC 40FA	60	40	-

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ลำดับ	สัญลักษณ์ *	ปูนซีเมนต์ (% by weight)	เถ้าลอย (% by weight)	ผงหินปูน (% by weight)
17	MC 40FB	60	40	-
18	MC 40FC	60	40	-
19	MC 40FD	60	40	-
20	MC 40FE	60	40	-
21	MC 40FF	60	40	-
22	MC 30FA 10L	60	30	10
23	MC 30FB 10L	60	30	10
24	MC 30FC 10L	60	30	10
25	MC 30FD 10L	60	30	10
26	MC 30FE 10L	60	30	10
27	MC 30FF 10L	60	30	10

*** หมายเหตุ:**
MC คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
MC5 คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน
MC 10L คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10
MC 20FA คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A ร้อยละ 20
MC 40FB คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง B ร้อยละ 40
MC 10FC 10L คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง C ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
MC 30FD 10L คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

2.2 สัดส่วนผสม

ตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีทั้งหมด 27 สัดส่วนผสม รายละเอียดสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์แสดงในตารางที่ 3 โดยใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (s/b) เท่ากับ 2.75 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ตลอดการศึกษา

2.3 สารละลายซัลเฟต

สารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ที่ความเข้มข้นสารละลายร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือปริมาณซัลเฟตอิออน (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33,800 ppm เตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟตโดยใช้โซเดียมซัลเฟต 50 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ได้ปริมาณซัลเฟตอิออนเท่ากับ 33800 ppm ส่วนสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตแยกเตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซัลเฟต 42.36 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ได้ปริมาณซัลเฟตอิออนที่เท่ากัน เตรียมสารละลายไว้ล่วงหน้า 1 วัน อุณหภูมิสารละลายขณะแช่ตัวอย่างประมาณ 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนปริมาตรสารละลายต่อปริมาตรตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ประมาณ 4 ต่อ 1 และจัดให้มีระบบการหมุนเวียนสารละลายในถังแช่ตัวอย่าง โดยสารละลายที่ใช้แช่ตัวอย่างจะมีการเปลี่ยนทุกๆอายุการแช่ตัวอย่าง 2 เดือน

2.4 การเตรียมตัวอย่าง

การศึกษาครั้งนี้ใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 25x25x285 มม. เพื่อวัดค่าการขยายตัว และใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 50x50x50 มม. เพื่อวัดค่าการสูญเสียน้ำหนัก ทำการหล่อตัวอย่างในแบบหล่อแล้วบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง ถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง หลังจากถอดแบบนำตัวอย่างไปแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (Saturated lime water) เป็นเวลา 28 วัน

2.5 การทดสอบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์

การประเมินความต้านทานซัลเฟตในการศึกษาครั้งนี้ ประเมินโดยวัดค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 25x25x285 มม. เมื่อแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาวครบ 28 วัน แล้วจึงนำชิ้นตัวอย่างไปวัดความยาวเริ่มต้นเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานด้วยเครื่องวัดความยาว (Length Comparator) หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายที่ได้เตรียมไว้ ที่ระยะเวลาการแช่ในสารละลายครบ 2, 4, 8, 13, 20, 28, 36, 44, 52, 60, 68, 76, 84 และ 92 สัปดาห์ นำตัวอย่างไปวัดการเปลี่ยนแปลงความยาว ตามมาตรฐาน ASTM C 1012 โดยค่าการขยายตัวที่นำมาใช้รายงานผลจะได้จากค่าเฉลี่ยของค่าการขยายตัวของ 4 ชิ้นตัวอย่าง

2.5.2 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 50x50x50 มม. เมื่อแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาวครบ 28 วัน นำชิ้นตัวอย่างล้างทำความสะอาดเอาปูนขาวและสิ่งสกปรกที่อาจติดอยู่ที่ผิวออก หลังจากนั้นเช็ดด้วยผ้าให้ผิวแห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเริ่มต้น หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายที่ได้เตรียมไว้ ที่ระยะเวลาการแช่ในสารละลายครบ 90 สัปดาห์ นำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์มาปัดผิวด้วยแปรงเพื่อให้เศษมอร์ต้าร์ที่เสื่อมสภาพหลุดออกและซับผิวให้แห้งด้วยผ้า แล้วนำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อนำค่าน้ำหนักที่วัดได้ไปหาการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์เนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์

การประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยวัดค่าการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน มีรายละเอียดผลการทดสอบและวิเคราะห์ดังนี้

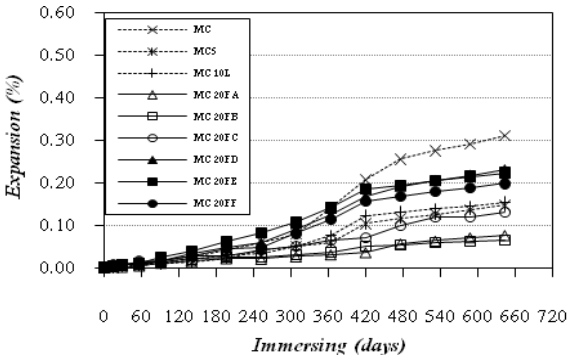
3.1 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

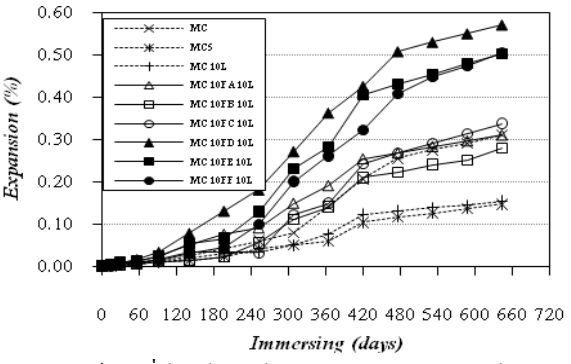
จาก รูปที่ 1 (ก) พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะปริมาณ C_3A ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 น้อยกว่าส่งผลให้เกิดเอททริงไจท์ (Ettringite) น้อยกว่า [8,9] ทำให้การขยายตัวน้อยกว่า ส่วนการขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน มีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน แต่น้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะผงหินปูนเป็นวัสดุเฉื่อย เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ $Ca(OH)_2$ น้อยลง การขยายตัวจึงน้อยลง ขณะที่มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยนั้น พบว่าการแทนที่ของทุกตัวอย่างเถ้าลอย (6 ตัวอย่าง) การขยายตัวของมอร์ต้าร์ดังกล่าวมีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณ C_3A และ C_4AF ลดลง อีกทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานยังเปลี่ยน $Ca(OH)_2$ ให้เป็น

CSH จึงเป็นการเพิ่มสภาพการทนทานการกัดกร่อน และการลดลงของ $Ca(OH)_2$ ทำให้เกิดเอททริงไจท์น้อยลง การขยายตัวจึงน้อยลง และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A (เถ้าลอย A, B และ C) มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และน้อยกว่ามอร์ต้าร์ผงหินปูน ในขณะที่การขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด D (เถ้าลอย D, E และ F) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และมากกว่ามอร์ต้าร์ผงหินปูนด้วย ซึ่งทั้งนี้เป็นไปได้ว่าเถ้าลอยตัวอย่าง D มีปริมาณ CaO และ SO_3 ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 22.46 และ 5.08 ตามลำดับ) ในขณะที่เถ้าลอยตัวอย่าง A มีปริมาณ CaO และ SO_3 ต่ำกว่า (ร้อยละ 13.69 และ 1.86 ตามลำดับ) เพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงในอัตราการแทนที่ต่ำ (ร้อยละ 20) จะทำให้การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่ามาก [10] ประกอบกับ SO_3 สามารถทำให้เพสต์ที่แข็งตัวแล้วเกิดการขยายตัวได้ [11] ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด D แต่เมื่อพิจารณาถึงการขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A หรือเถ้าลอยตัวอย่างชุด D พบว่าปริมาณที่แตกต่างกันของ Free CaO มีผลต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตน้อยมาก หรืออาจกล่าวได้ว่าไม่มีผลต่อการขยายตัว (ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่าง A แตกต่างจากเถ้าลอยตัวอย่าง B และ C เพียงร้อยละ 0.012 และ 0.053 ตามลำดับ-เช่นเดียวกับของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่าง D ตัวอย่าง E และตัวอย่าง F ก็ให้ผลไม่แตกต่างกัน โดยค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่าง D แตกต่างจากเถ้าลอยตัวอย่าง E และ F เพียงร้อยละ 0.006 และ 0.031 ตามลำดับ

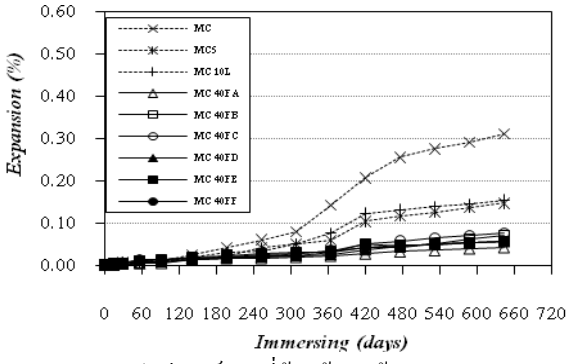
รูปที่ 1 (ข) เป็นการเปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างระหว่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 10 (ทั้ง 6 ตัวอย่างเถ้าลอย) ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่า ทุกตัวอย่าง



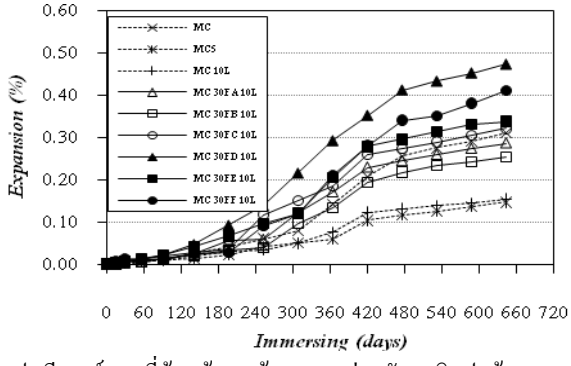
(ก) ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20



ข) ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



(ค) ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40



(ง) ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

เถ้าลอยที่แทนที่ร่วมกับผงหินปูน มีผลให้การขยายตัวมีค่ามากกว่าทั้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วนและมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน ทั้งนี้อาจเป็นไปได้เพราะผงหินปูนที่ใช้มีขนาดอนุภาคค่อนข้างเล็กเข้าเติมเต็มช่องว่างในเพสต์ ทำให้ขนาดโพรงเล็กลง ไม่มีช่องว่างให้เอททริงไจท์ที่เกิดขึ้น จึงทำให้เพสต์ขยายตัวมากขึ้น โดยที่การขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A (เถ้าลอย A, B และ C) มีค่าใกล้เคียงกับของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่การขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด D (เถ้าลอย D, E และ F) มีค่าค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้ก็เพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยซึ่งมีปริมาณ CaO ค่อนข้างสูง (เถ้าลอยตัวอย่าง D ซึ่งมีปริมาณ CaO ร้อยละ 22.46) ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ต่ำ คือร้อยละ 10 ส่งผลให้การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่ามากขึ้น ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว และเช่นกันจากตารางที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A และชุด D ก็จะเห็นว่าผลจากปริมาณ Free CaO ที่แตกต่างกัน มีผลน้อยต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เพราะการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในแต่ละชุดของเถ้าลอยแตกต่างกันไม่มากและไม่ได้มีแนวโน้มว่าเถ้าลอยที่มี Free CaO สูงกว่าจะขยายตัวมากกว่า

ส่วน รูปที่ 1 (ค) เป็นการเปรียบเทียบการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตระหว่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 (ทั้ง 6 ตัวอย่างเถ้าลอย) ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ซึ่งเป็นปริมาณการแทนที่ค่อนข้างสูง ไม่ว่าตัวอย่างเถ้าลอยจะมีปริมาณ CaO ที่สูงหรือต่ำ จะมีผลให้การขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าน้อย ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานมีประสิทธิภาพ (ลด $Ca(OH)_2$) มากกว่าผลของปริมาณ CaO ที่สูงของเถ้าลอย [10]

สุดท้าย รูปที่ 1 (ง) พบว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีแนวโน้มว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่างชุด D ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าทั้งมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ผงหินปูน (ร้อยละ 10) ในขณะที่มอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่าการขยายตัวใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่มีค่ามากกว่าทั้งมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วนและมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ทั้งนี้อาจเป็นได้เพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้เพสต์มีความพรุนน้อยลง ผงหินปูนก็เข้าเติมเต็มช่องว่างทำให้ขนาดโพรงเล็กลง จากผลดังกล่าวทำให้ไม่มีช่องว่างสำหรับเอททริงไจท์ การขยายตัวจึงมากขึ้น ดังที่กล่าวมาแล้ว ส่วนผลจากปริมาณ Free CaO ที่แตกต่างกัน ส่งผลค่อนข้างน้อย เห็นได้จากตารางที่ 4 ซึ่งค่าการขยายตัวสลับไปมา แสดงว่ามีผลจากสาเหตุอื่นมากกว่าผลของปริมาณ Free CaO ที่ต่างกัน

3.2 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

รูปที่ 2 แสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ที่ระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 90 สัปดาห์

จากรูปที่ 2 (ก) เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และร้อยละ 40 (ทั้ง 6 ตัวอย่างเถ้าลอย) พบว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ C_3S ของ

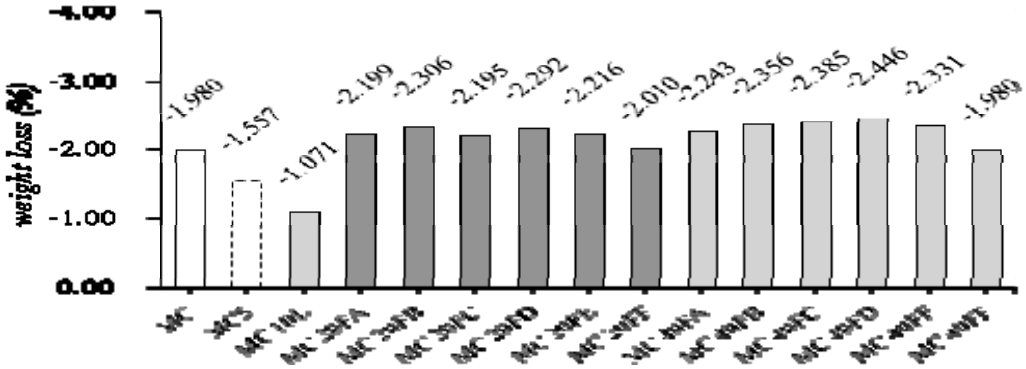
ตารางที่ 4 ค่าการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต

ตัวอย่างมอร์ต้าร์ *	ร้อยละการขยายตัว ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่ระยะเวลาการแช่ 92 สัปดาห์	ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่ระยะเวลาการแช่ 90 สัปดาห์
MC 20FA	0.077	-2.199
MC 20FB	0.065	-2.306
MC 20FC	0.130	-2.195
MC 20FD	0.229	-2.292
MC 20FE	0.223	-2.216
MC 20FF	0.198	-2.010
MC 10FA 10L	0.309	-1.709
MC 10FB 10L	0.279	-1.771
MC 10FC 10L	0.337	-1.644
MC 10FD 10L	0.570	-1.530
MC 10FE 10L	0.502	-1.487
MC 10FF 10L	0.504	-1.440
MC 40FA	0.042	-2.243
MC 40FB	0.070	-2.356
MC 40FC	0.077	-2.385
MC 40FD	0.055	-2.446
MC 40FE	0.056	-2.331
MC 40FF	0.056	-1.980
MC 30FA 10L	0.286	-1.700
MC 30FB 10L	0.254	-1.630
MC 30FC 10L	0.321	-1.470
MC 30FD 10L	0.472	-1.761
MC 30FE 10L	0.337	-1.815
MC 30FF 10L	0.411	-1.601

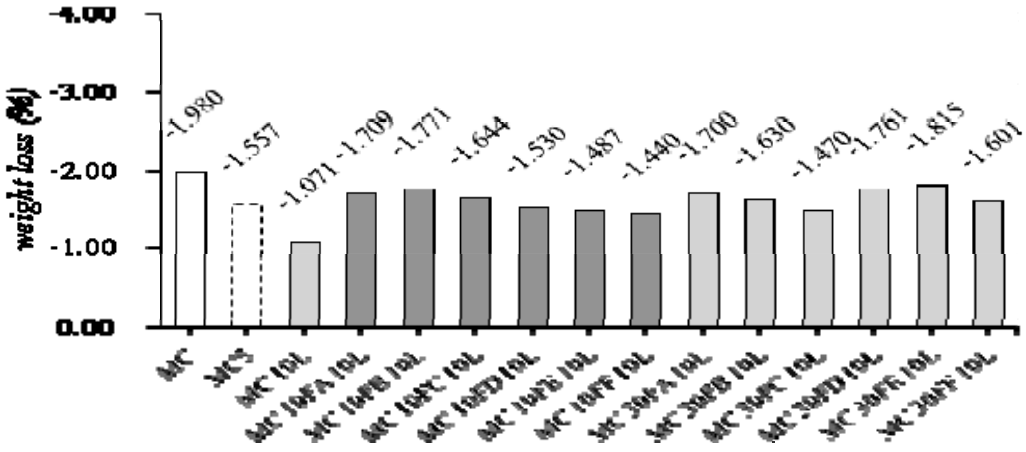
หมายเหตุ * สัญลักษณ์ตัวแทนตัวอย่างมอร์ต้าร์ใช้เช่นเดียวกับตารางที่ 3

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มากกว่า ส่งผลให้การสะสมของยิปซั่ม บรูไซ (MH) และซิลิกาเจล (S_2H) มากกว่า และการเปลี่ยน CSH เป็น MSH ก็เกิดมากกว่าอีกด้วย ซึ่งเป็นผลเสียต่อเนื้อมอร์ต้าร์เพราะ MSH เป็นสารประกอบที่ไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่ามีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าทั้งมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและประเภทที่ 5 ล้วน เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนซึ่งมีอนุภาคเล็กมาก เป็นการช่วยในการเติมเต็มช่องว่างในเพสต์ทำให้มีความทึบน้ำมากขึ้น

รวมทั้งการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงทำให้ C_3S และ C_2S น้อยลง การสะสมของยิปซั่ม บรูไซ และซิลิกาเจลจึงน้อยลง และ MSH ก็เกิดน้อยลงด้วย ขณะที่มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และร้อยละ 40 นั้น พบว่าการแทนที่ด้วยตัวอย่างเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่างเถ้าลอย) ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าทั้งมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยซึ่งไปลด $Ca(OH)_2$ ทำให้ความเป็นด่างลดลง จึงเกิดความไม่เสถียรภาพในมอร์ต้าร์ ดังนั้นการสลายตัวของ CSH ซึ่งเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นหรือปฏิกิริยาปอซโซลานก็แล้วแต่ กลายเป็น MSH มากขึ้น ซึ่งก็สอดคล้องกับการวิจัยของปิติศานต์และคณะ [10] โดยเฉพาะการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 40 มีแนวโน้มว่าจะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าการแทนที่ร้อยละ 20



ก) ปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย



(ข) ปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน

รูปที่ 2 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ระยะเวลาการแช่ 90 สัปดาห์

รูปที่ 2 (ข) เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่างเถ้าลอย) ร่วมกับผงหินปูน พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์

ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนนั้น มีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยมากกว่ามอร์ต้าร์ผงหินปูนร้อยละ 10

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของ Free CaO ต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พิจารณาประกอบกับตารางที่ 4) พบว่าปริมาณที่แตกต่างกันของ Free CaO (ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้) มีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์น้อยมากหรืออาจกล่าวว่าไม่มีผล ทั้งนี้สังเกตุได้จากค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A (เถ้าลอย A, B และ C) และมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด D (เถ้าลอย D, E และ F) ทั้งการแทนที่ด้วยเฉพาะเถ้าลอยร้อยละ 20, 40 การแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ต่างก็ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักที่แตกต่างกันน้อยและไม่มีแนวโน้มว่าการสูญเสียน้ำหนักจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณ Free CaO แต่อย่างใด

4. สรุป

จากผลการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่ามากกว่าประเภทที่ 5 ล้วน ในขณะที่การขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูน (ขนาด 3 ไมโครเมตร) ร้อยละ 10 มีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และพบว่ามอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย หรือเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะให้ค่าการขยายตัวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย กล่าวคือ ถ้าเถ้าลอยมีปริมาณ CaO ต่ำ ไม่ว่าปริมาณการแทนที่สูงหรือต่ำจะมีแนวโน้มให้ค่าการขยายตัวที่น้อย ในขณะที่เถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูง ถ้าแทนในปริมาณที่ต่ำจะให้ค่าการขยายตัวที่มาก แต่ถ้าแทนที่ในปริมาณสูงกลับให้ค่าการขยายตัวน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับการไม่แทนที่ ส่วนในกรณีสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่ามากกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูน ขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และร้อยละ 40 นั้น มีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วน ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน พบว่าทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์น้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน สำหรับปริมาณ Free CaO ที่ต่างกันในเถ้าลอย พบว่าไม่มีผลกระทบต่อค่าการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ที่ให้การสนับสนุนในงานวิจัยนี้

5. เอกสารอ้างอิง

[1] K. Wesche, “Fly Ash in Concrete Properties and Performance”, Taylor & Francis e-Library, 2005, pp. 9-16.

[2] J. Zuquan, S. Wei, Z.Yunsheng, J. Jinyang. and L. Jianzhong, “Interaction between sulfate and chloride solution attack of concretes with and without fly ash”, Cement and Concrete Research Journal, 37, 2007, pp. 1223-1232.

[3] P. Chindaprasirt, Fly ash in concrete (The updated edition). Thailand Concrete Association, 2000. (in Thai)

[4] A. D. Cengiz, k. Alaeettin and S. K. Umur, “Properties of high performance concrete systems incorporating large amounts of high-lime fly ash”, Construction and Building Materials Journal, 9, 1995, pp. 203.

[5] N. Voglis, G. Kakali, E. Chaniotakis, and S. Tsivilis, "Portland-Limestone cement their properties and hydration compared to those of other composite cements", Cement & Concrete Composites Journal, 27, 2005, pp. 191–196.

[6] P. Chalattunyakij, P. Krammart, O.S. Baghabra, M. Maslehuddin, and M. M. Saadi,, "Effect of Addition of Free Lime in Fly Ash on Expansion and Weight Loss in Sulfate Solution of Mortar with Fly Ash and Limestone Powder", Proceeding of the 6th Annual Concrete Conference, Phetchaburi, Thailand, 2010, pp. 389-399. (in Thai)

[7] S. Tangtermsirikul, "Durability and Mix Design of Concrete", Printing House of Thammasat University, Rangsit Campus. 2003, pp. 104-109.

[8] Al-Amoudi, O.S. Baghabra, M. Maslehuddin, and M. M. Saadi,, "Effect of Magnesium and Sodium Sulfate on the Durability Performance of Plain and Blended Cements", ACI Materials Journal, 92, 1995, pp. 15-24.

[9] S. Sukayanudist, P. Krammart , "Effect of Limestone Powder on Expansion of Mortar in Sodium Sulfate Solution", Proceeding of the 5th Annual Concrete Conference, Nakornratchasima, Thailand, 2009, pp. 241-248. (in Thai)

[10] P. Krammart and S. Tangtermsirikul, "Expansion, Strength Reduction and Weight Loss of Fly Ash Concrete in Sulfate Solution", ASEAN Journal on Science & Technology for Development, 12, 2004.

[11] P. Chindaprasirt and C. Jaturapitakkul, "Cement, Pozzolan and Concrete", Thailand Concrete Assocoation, 2000. (in Thai)