

การขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูน

Expansion and Weight Loss in Sulfate Solution of Mortar with Fly Ash, Ground Granulated Blast-Furnace Slag, Silica Fume and Limestone Powder

ปิติศานต์ กร้ามาตร¹ จตุพล ตั้งปกาศิต^{2*} ราพีง ชัยหลี่เจริญ³ และสมนึก ตั้งเดิมสิริกุล⁴
pitisan.k@en.rmutt.ac.th¹, jatuphon_t@rmutt.ac.th²,
rumpueng.c@en.rmutt.ac.th³, somnuk@siit.tu.ac.th⁴

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูน ซึ่งเป็นวัสดุกากอุตสาหกรรม โดยแทนที่วัสดุดังกล่าวในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผลการศึกษาพบว่า ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น การขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ยกเว้นเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนอย่างเดียว และแทนที่ด้วยเถ้าลอยหรือตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่น้อย ๆ ไม่ว่าจะแทนที่อย่างเดียว และ/หรือร่วมกับผงหินปูน จะให้ค่าการขยายตัวมากกว่าหรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ้งไม่แตกต่างจากของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และการแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์มีแนวโน้มให้การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ยกเว้นเมื่อแทนที่ร่วมกับปริมาณที่มากของเถ้าลอยและ/หรือตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

คำสำคัญ: มอร์ตาร์, การขยายตัว, การสูญเสียน้ำหนัก, สารละลายซัลเฟต

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์

^{2,3}อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

⁴ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

*Corresponding Author, E-mail: jatuphon_t@rmutt.ac.th

Abstract

This research aims to study the expansion in sodium sulfate solution and weight loss in magnesium sulfate solution of mortar with fly ash, ground granulated blast-furnace slag (GGBS), silica fume and limestone powder which are industrial wastes. These industrial wastes were used to partially replace in Portland cement type 1 (OPC). The study found that in sodium sulfate solution, expansion of mortars with fly ash, GGBS, silica fume and limestone powder was less than all of the OPC mortars. Except when replaced with limestone powder and with fly ash or GGBS at small quantities, the expansion will be higher than or close to all of the OPC mortars. Besides, in magnesium sulfate solution, weight loss of mortar with GGBS and fly ash was greater than all of the OPC mortars. While the weight loss of mortar with silica fume was no different from all of the OPC mortars. Finally, the replacement of limestone powder in OPC mortars tend to be lesser weight loss than OPC mortars, except when replaced with limestone powder at large amount of fly ash and / or GGBS.

Keywords: Mortar, Expansion, Weight loss, Sulfate solution.

1. บทนำ

เนื่องจากปัญหาสถานะโลกร้อนและกระแสการอนุรักษ์พลังงานรวมถึงสถานะการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจปัจจุบัน ทำให้มีการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น หากพิจารณาประโยชน์จากการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์โดยเฉพาะกรณีวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น เถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการถลุงเหล็ก โรงผลิตกระแสไฟฟ้า ตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียด (Ground granulated blast-furnace slag) ซึ่งเกิดจากกระบวนการถลุงเหล็ก ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมทัลและเพอร์โรซิ-

ลิกอนอัลลอยด์ และผงหินปูน (Limestone powder) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการย่อยหิน เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ ย่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตและพัฒนาคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น รวมทั้งสามารถแก้ปัญหาการกำจัดของเสียและช่วยประหยัดพลังงาน

ปัจจุบันสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ ที่ใช้คอนกรีตเป็นวัสดุเมื่อสัมผัสกับสารละลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) ทำให้คอนกรีตถูกกัดกร่อน ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างบางส่วนเสียหาย ดังนั้นการก่อสร้าง

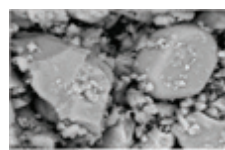
อาคารคอนกรีตจำเป็นต้องพิจารณาความคงทนของคอนกรีตที่สัมผัสกับสารละลายซัลเฟตซึ่งเป็นปัจจัยหลักประการหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาในการก่อสร้างอาคาร เช่น น้ำใต้ดิน น้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเล และน้ำเสียจากโรงงาน เป็นต้น สภาพแวดล้อมดังกล่าวมีสารละลายซัลเฟตเจือปนอยู่จำนวนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมนั้น สารละลายซัลเฟตสามารถกัดกร่อนสร้างความเสียหายให้กับคอนกรีตโดยตรง ส่งผลกระทบให้สิ่งก่อสร้างนั้นเสียหายตามไปด้วย นำไปสู่การพังของโครงสร้างทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณในการซ่อมแซม จากการสืบค้นผลงานวิจัย [1, 2, 3 และ 4] ซึ่งให้ผลในแนวทางเดียวกัน กล่าวคือการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan materials) เช่น เถ้าลอย และตะกอนเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น ในอัตราส่วนที่เหมาะสม สามารถต้านทานซัลเฟตได้ดี อย่างไรก็ตามปัจจัยบางอย่างก็ให้ผลในด้านลบได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์จะดีกว่าไม่มีการแทนที่เมื่อสัมผัสกับสารละลายโซเดียมซัลเฟต แต่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต กลับแย่กว่าเมื่อเทียบกับการไม่แทนที่ [1 และ 2]

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกอนเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ซึ่งเป็นวัสดุกากอุตสาหกรรมแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำวัสดุดังกล่าวผสมในคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

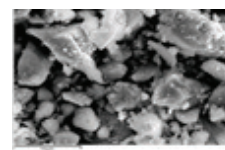
2. ระเบียบวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

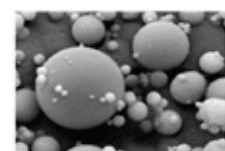
สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (FM) และจากโรงไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง (FR) ตะกอนเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน (ขนาด 8 ไมโครเมตร) มวลรวมใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และสารละลายซัลเฟตใช้โซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต โดยรูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาโดยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) กำลังขยาย 3,500 เท่า ส่วนตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลน ของวัสดุประสานที่ใช้



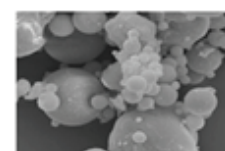
ก) ปูนซีเมนต์
ประเภทที่ 1



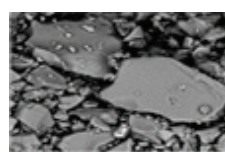
ข) ปูนซีเมนต์
ประเภทที่ 5



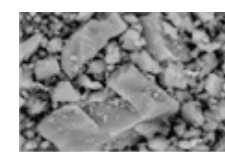
ค) เถ้าลอยแม่เมาะ (FM)



ง) เถ้าลอยระยอง (FR)



จ) ตะกอนเตาถลุงเหล็ก
บดละเอียด



ฉ) ผงหินปูน

รูปที่ 1 ลักษณะของอนุภาคของวัสดุประสานซึ่งเป็นภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,500 เท่า

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท		เถ้าลอย		ตะกรันเตาถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟุ่ม	ผงหินปูน
	ที่ 1	ที่ 5	แม่เมาะ	ระยอง			
SiO ₂	18.93	20.97	35.71	61.46	34.06	92.00	0.45
Al ₂ O ₃	5.51	3.49	20.44	20.27	16.27	0.70	0.05
Fe ₂ O ₃	3.31	4.34	15.54	5.56	1.70	1.20	0.03
CaO	65.53	63.86	16.52	1.73	36.05	0.20	55.20
MgO	1.24	3.33	2.00	0.96	7.38	0.20	0.34
Na ₂ O	0.15	2.12	1.15	0.73	2.16	-	<
K ₂ O	0.31	0.12	2.41	1.36	0.21	-	<
SO ₃	2.88	0.47	4.26	0.38	1.09	1.50	0.01
LOI	-	1.44	0.49	5.38	1.44	-	43.12
Free lime	1.00	1.01	1.71	0.03	-	-	-
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	3.18	2.53	2.22	2.96	2.21	2.69
ความละเอียดเบอน; ซม./ก.	3,190	3,340	2,723	2,722	4,600	-	5,210

หมายเหตุ : เนื่องด้วยวิธีเบลนไม่สามารถใช้วัดค่าความละเอียดของซิลิกาฟุ่มได้ (อาจใช้วิธี nitrogen absorption แทน)

2.2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม และผงหินปูน โดยวัดการขยายตัว (Expansion) ของตัวอย่างมอร์ตาร์เฉพาะในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และวัดการสูญเสียน้ำหนักเฉพาะในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ทั้งนี้เพราะการทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อคอนกรีตโดยหลักแล้วเป็นการเปลี่ยนผลผลิตของเพสต์ให้เป็น Ettringite ซึ่งมีคุณสมบัติในการขยายตัว ในขณะที่การทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคอนกรีตนั้นเป็นการเปลี่ยนแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ให้เป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรต (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน [5] โดยรายละเอียดสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 และอัตราส่วน

ทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 โดยน้ำหนักตลอดการศึกษา

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม และผงหินปูนที่ใช้

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท		เถ้าลอย		ตะกรันเตาถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟุ่ม	ผงหินปูน
	ที่ 1	ที่ 5	แม่เมาะ (FM)	ระยอง (FR)			
C1	1.00	-	-	-	-	-	-
C5	-	1.00	-	-	-	-	-
C1-20FM	0.80	-	0.20	-	-	-	-
C1-40FM	0.60	-	0.40	-	-	-	-
C1-20FR	0.80	-	-	0.20	-	-	-
C1-40FR	0.60	-	-	0.40	-	-	-
C1-30SL	0.70	-	-	-	0.30	-	-
C1-50SL	0.50	-	-	-	0.50	-	-
C1-5SF	0.95	-	-	-	-	0.05	-
C1-10SF	0.90	-	-	-	-	0.10	-
C1-5LP	0.95	-	-	-	-	-	0.05
C1-10LP	0.90	-	-	-	-	-	0.10
C1-15FM-5LP	0.80	-	0.15	-	-	-	0.05
C1-10FM-10LP	0.80	-	0.10	-	-	-	0.10
C1-35FM-5LP	0.60	-	0.35	-	-	-	0.05
C1-30FM-10LP	0.60	-	0.30	-	-	-	0.10
C1-15FR-5LP	0.80	-	-	0.15	-	-	0.05
C1-30FR-10LP	0.60	-	-	0.30	-	-	0.10
C1-25SL-5LP	0.70	-	-	-	0.25	-	0.05
C1-20SL-10LP	0.70	-	-	-	0.20	-	0.10
C1-45SL-5LP	0.50	-	-	-	0.45	-	0.05
C1-40SL-10LP	0.50	-	-	-	0.40	-	0.10
C1-5SF-5LP	0.90	-	-	-	-	0.05	0.05
C1-10SF-5LP	0.85	-	-	-	-	0.10	0.05

หมายเหตุ :

C1 หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

C5 หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน

C1-20FM หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 20

C1-30SL หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 30

C1-5LP หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5

C1-15FM-5LP หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5

C1-25SL-5LP หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5

2.3 วิธีการศึกษา

ในการศึกษาการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ ใช้ขนาดตัวอย่าง $25 \times 25 \times 285$ มม.³ ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์นั้นใช้ตัวอย่างขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม.³ ทำการบ่มตัวอย่างในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างมอร์ตาร์ไปแช่ในสารละลายซัลเฟตซึ่งมีความเข้มข้นของไอออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33,800 ppm (โดยใช้สารโซเดียมซัลเฟต 50 กรัม ในขณะที่ใช้สารแมกนีเซียมซัลเฟต 43.26 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร ทั้งนี้เพื่อให้ได้ปริมาณ SO_4^{2-} เท่ากับ 33,800 ppm) แล้วทำการทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 2, 4, 8 และ 13 สัปดาห์ และทุก ๆ 8 สัปดาห์ ซึ่งแต่ละสัปดาห์ผสมของมอร์ตาร์ใช้ 3 ตัวอย่าง เพื่อเฉลี่ยหาค่าการขยายตัว และค่าการสูญเสีย น้ำหนัก โดยใช้ปริมาณของสารละลายซัลเฟตต่อปริมาณของตัวอย่างมอร์ตาร์เท่ากับ 4:1 และมีการเปลี่ยนสารละลายซัลเฟตทุก ๆ 2 เดือนของการแช่ตัวอย่าง

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 การขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

การพิจารณาการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น ได้พิจารณาผลกระทบจากการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูนโดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 กรณีวัสดุประสานร่วม 2 ชนิด

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง

การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์กับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างที่ใช้วัสดุประสานร่วม 2 ชนิด พบว่า การขยายตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณไตรแคลเซียมอัลูมิเนต (C_3A) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ทำให้เกิดปริมาณยิปซัมและ Ettringite มากกว่า ส่งผลให้เกิดการขยายตัวที่มากกว่า ส่วนการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (ทั้ง 2 ชนิด) ร้อยละ 20 และ 40 (รูปที่ 2ก และ 2ข) มีค่าน้อยกว่า หรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าลอยนั้น เป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ และผลของการปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยลดปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จึงทำให้เกิดยิปซัมและ Ettringite น้อย ส่งผลให้เกิดค่าของการขยายตัวน้อย โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้น (ร้อยละ 40)

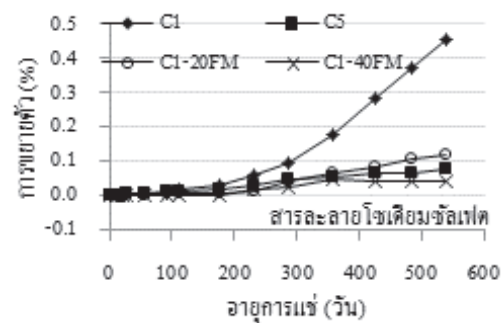
สำหรับการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (รูปที่ 2ค) พบว่ามอร์ตาร์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 30 มีแนวโน้มใกล้เคียงหรือมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ก่อนข้างสูง (ร้อยละ 36.05) ในปริมาณที่น้อยนั้น ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดน้อย ซึ่งลดปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ได้น้อย ทำให้ Ettringite เกิดมาก ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 50 มีค่าการขยายตัวใกล้เคียงหรือแนวโน้มที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ร้อยละ 50 ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดมาก จึงสามารถ

ลดปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ได้มาก ส่งผลให้เกิด Ettringite น้อย

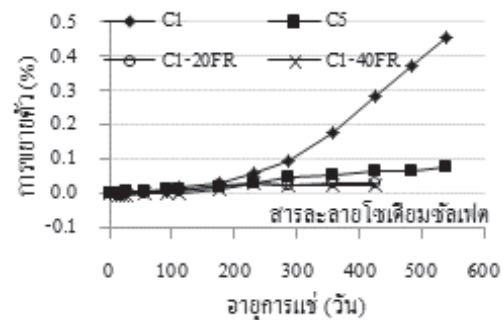
ส่วนการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูมทั้งร้อยละ 5 และ 10 (รูปที่ 2ง) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยเฉพาะร้อยละ 10 มีค่าการขยายตัวที่น้อยกว่าร้อยละ 5 ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมนั้นเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานไปช่วยลดปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ทำให้ลดปริมาณ Ettringite นอกจากนี้ซิลิกาฟูมซึ่งมีอนุภาคค่อนข้างละเอียดสามารถช่วยเติมเต็มในช่องว่างของเพสต์ ทำให้สารละลายโซเดียมซิลิเฟตเข้าได้ยากขึ้น จากเหตุผลที่กล่าวมาจึงทำให้การขยายตัวมีค่าน้อย

ในส่วนการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 (รูปที่ 2จ) มีแนวโน้มใกล้เคียงหรือมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากผงหินปูนไม่มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่จะมีคุณสมบัติทางกายภาพ กล่าวคือผงหินปูนจะเข้าไปอุดช่องว่างในมอร์ตาร์ทำให้มอร์ตาร์มีความแน่นเพิ่มขึ้น และทำให้ช่องว่างเหลือน้อยลงสำหรับการเกิด Ettringite ทำให้เกิดการขยายตัวมากขึ้น และพบว่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 มีค่ามากกว่าของร้อยละ 10 ทั้งนี้เพราะการแทนที่ร้อยละ 10 สามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้มากกว่า รวมทั้งอาจเป็นเพราะการผสมผงหินปูนร้อยละ 5 อาจทำให้มอร์ตาร์มีความทึบแน่นมากกว่าร้อยละ 10 จึงมีช่องว่างสำหรับเกิด Ettringite น้อยกว่า จึงทำให้เกิดการขยายตัวมากกว่า

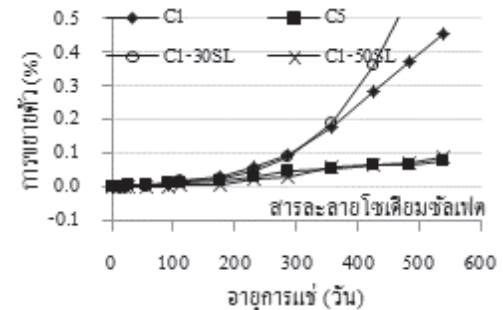
ส่วนรูปที่ 3 แสดงการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยตะกอนเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ที่อายุ 61 สัปดาห์ (427 วัน) ซึ่งเห็นได้ชัดเจนถึงผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย ตะกอนเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ต่อการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ตาร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



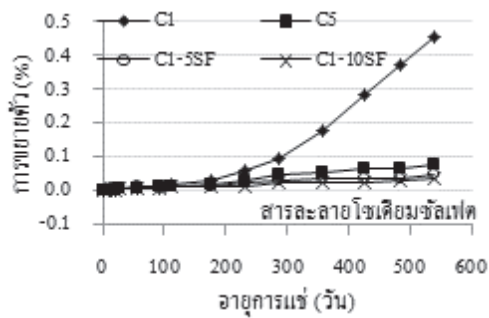
ก) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (FM)



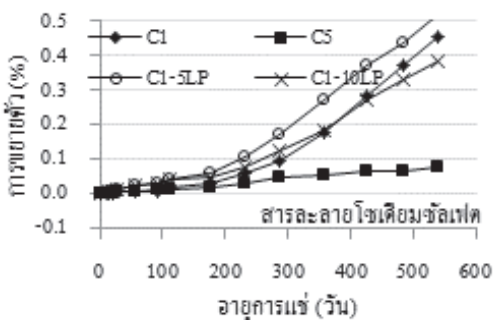
ข) ผสมเถ้าลอยระยอง (FD)



ค) ผสมตะกอนเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

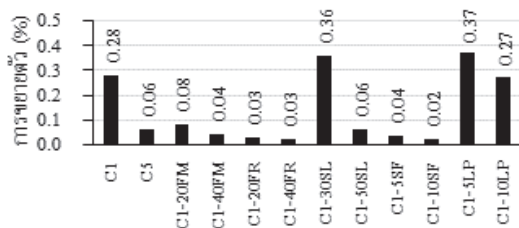


ง) ผสมซิลิกาฟุ่ม



จ) ผสมผงหินปูน

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม และผงหินปูน



รูปที่ 3 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม และผงหินปูน ที่อายุ 61 สัปดาห์ (427 วัน)

3.1.2 กรณีวัสดุประสานร่วม 3 ชนิด

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์กับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซิลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่

ใช้วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด พบว่า การขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย FM ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 (รูปที่ 4ก) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าลอย FM (ที่ใช้ในครั้งนี้) มีปริมาณ CaO ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 16.52) ในปริมาณที่ต่ำผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยลด Ca(OH)_2 ได้น้อย จึงทำให้เกิด Ettringite มากขึ้น และผงหินปูนจะช่วยในการเติมเต็มช่องว่างทำให้ตัวอย่างมอร์ตาร์มีช่องว่างน้อยลง ส่งผลให้การขยายตัวมากขึ้น แต่เมื่อผสมเถ้าลอย FM ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 35 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 กลับให้ค่าการขยายตัวที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะการผสมเถ้าลอย FM ในปริมาณมากเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้มาก และทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้มากขึ้น จึงทำให้เกิด Ettringite น้อยลง อีกทั้งผงหินปูนซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กมีความสามารถในการอุดช่องว่างทำให้ไอออนซิลเฟตเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ยากขึ้น

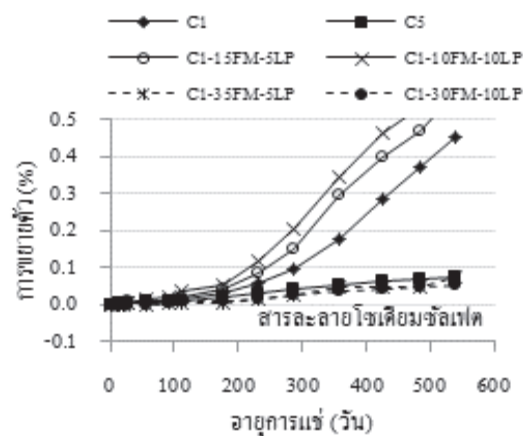
ส่วนการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย FR (ซึ่งมีปริมาณ CaO ค่อนข้างต่ำ คือร้อยละ 1.75) ผสมร่วมกับผงหินปูนให้ค่าค่อนข้างน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน (รูปที่ 4ข) ทั้งนี้เพราะเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์แล้ว และปริมาณ CaO ของเถ้าลอยน้อย รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยจึงทำให้เกิด Ettringite ได้น้อยมาก ดังเหตุผลที่ได้กล่าวแล้ว

รูปที่ 4ค แสดงการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน พบว่าการ

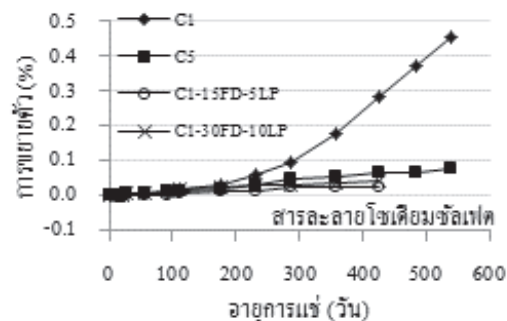
ขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากการผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 36.05) ในปริมาณที่น้อยนั้น ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดน้อยซึ่งทำให้ลดปริมาณ Ca(OH)_2 ได้น้อยทำให้ Ettringite เกิดมาก และผงหินปูนส่งผลให้มอร์ตาร์มีความแน่นขึ้น จึงทำให้มีช่องว่างไม่เพียงพอต่อการเกิด Ettringite ทำให้เกิดการขยายตัวมาก อย่างไรก็ตามในกรณีมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 ผสมร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และผสมร้อยละ 45 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 กลับให้ค่าการขยายตัวใกล้เคียงกับของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่สารในละลายโซเดียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และผสมซิลิกาฟุ่มร่วมกับผงหินปูน พบว่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ่มร่วมกับผงหินปูนทุกสัดส่วนผสมที่ศึกษา มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ทั้งนี้เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

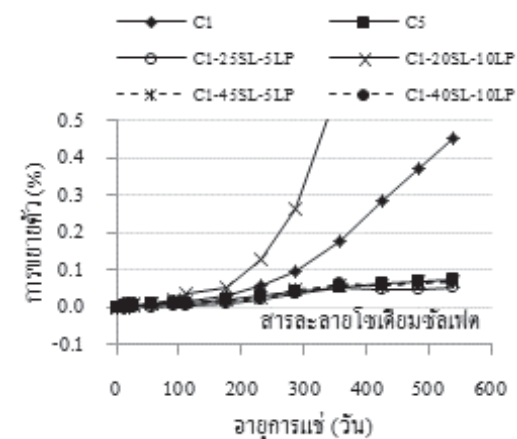
รูปที่ 5 แสดงการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน และซิลิกาฟุ่มร่วมกับผงหินปูน ที่อายุ 61 สัปดาห์ (427 วัน) ซึ่งทำให้เห็นได้ชัดเจนของการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ที่แตกต่างกัน ดังที่ได้กล่าวแล้ว



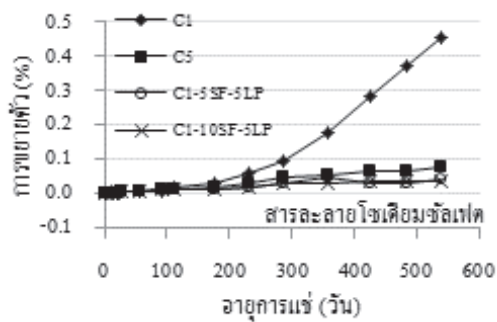
ก) ผสมเถ้าลอยชนิด FM ร่วมกับผงหินปูน



ข) ผสมเถ้าลอยชนิด FR ร่วมกับผงหินปูน

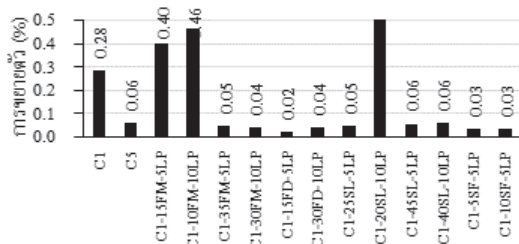


ค) ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน



ง) ผสมซิลิกาฟุ่มร่วมกับผงหินปูน

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน และซิลิกาฟุ่มร่วมกับผงหินปูน



รูปที่ 5 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน และซิลิกาฟุ่มร่วมกับผงหินปูน ที่อายุ 61 สัปดาห์ (427 วัน)

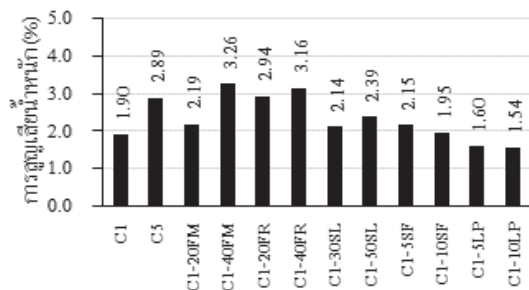
3.2 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟต

รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม และผงหินปูน ที่อายุ 61 สัปดาห์ (427 วัน) ของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟต พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่า

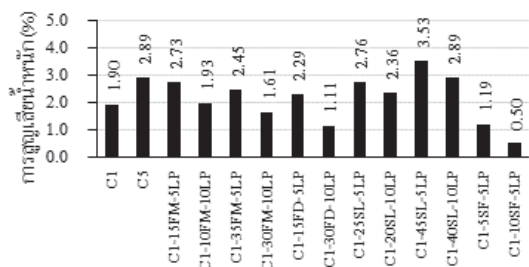
มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีความพรุนมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 [6] ทำให้สารละลายซิลเฟตเข้าไปทำลายได้มากขึ้น ส่วนการแทนที่เถ้าลอย (ทั้งชนิด FM และ FR ไม่ว่าจะเป็นร้อยละ 20 หรือร้อยละ 40) และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากผลจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้ความเป็นด่างในมอร์ตาร์น้อยลง (ลด $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้นในซีเมนต์เฟสดี จึงทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสานโดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้น ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ่มนั้นให้ค่าไม่แตกต่างจากของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนมากนัก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะซิลิกาฟุ่มมีอนุภาคค่อนข้างละเอียดมากจึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี รวมทั้งเป็นตัวเติมเต็ม ส่งผลให้เฟสดีมีความหนาแน่นมากขึ้น การเข้าทำลายซิลเฟตได้ยากขึ้น ซึ่งเช่นเดียวกับของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนให้ผลของการสูญเสียน้ำหนักที่ใกล้เคียงหรือน้อยกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีค่าน้อยกว่ากรณีของตัวอย่างที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยอย่างเดียวในปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจากผงหินปูนรบกวนปฏิกิริยาการเกิด MSH ส่งผลให้ MSH เกิดยากขึ้น [7] นั้น แสดงว่าในกรณีของสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟต การแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถต้านทานซิลเฟตได้ดี ในขณะที่การแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์กลับด้อยลง แต่อย่างไรก็ตาม

การแทนที่ของเถ้าลอยนั้นจะต้านทานซัลเฟตได้ดีในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ส่วนในกรณี 3 วัสดุประสาน (รูปที่ 6ข) สังเกตเห็นว่าการผสมผงหินปูนรวมทั้งเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และซิลิกาฟูม นั้น จะส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี 2 วัสดุประสาน (รูปที่ 6ก) ทั้งนี้ก็เพราะผงหินปูนนอกจากจะเป็นตัวเติมเต็มแล้วยังสามารถรบกวนปฏิกิริยาการเกิด MSH ดังที่กล่าวแล้ว



ก) กรณี 2 วัสดุประสาน



ข) กรณี 3 วัสดุประสาน

รูปที่ 6 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูนที่อายุ 61 สัปดาห์ (427 วัน)

4. สรุปผล

จากผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้ สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. เมื่อเผชิญสารละลายโซเดียมซัลเฟต การขยายตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่การขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ยกเว้นเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนอย่างเดียว และแทนที่ด้วยเถ้าลอยหรือตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่น้อย ๆ ไม่ว่าจะแทนอย่างเดียว และ/หรือร่วมกับผงหินปูน จะให้ค่าการขยายตัวมากกว่าหรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

2. เมื่อเผชิญสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูมไม่แตกต่างจากของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และการแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ ส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์มีแนวโน้มที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณประจำปี 2558 ในงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tangtermsirikul S. and Bumrungwong C, Conceptual Model for Determining Optimum Proportion of Fly Ash in Sulfate resisting Concrete, *Proceedings of the 3rd National Convention on Civil Engineering, Thailand*, January, 1997, pp. MAT 4-1 to 4-9.
- [2] Pitisan K. and Somnuk T., Expansion, Strength Reduction and Weight Loss of Fly Ash Concrete in Sulfate Solution, *ASEAN Journal on SCIENCE & TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT*, V21, 2004.
- [3] เจต นาคารย และปิติศานต์ กร้ามาตร, การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด, วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี, ปีที่ 11 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม), 2556.
- [4] ยงยุทธ์ วัฒนกุล ปิติศานต์ กร้ามาตร อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, คุณสมบัติด้านซีเมนต์ และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน, วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี, ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม), 2553.
- [5] 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.
- [6] Pitisan Krammart, "Properties of cement made by partially replacing cement raw materials with municipal solid waste ash and calcium carbide waste, and sulfate resistance of flyash concrete", Ph. D. Thesis, Civil Engineering, School of Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology Thammasat University, 2005.
- [7] Ittiporn S., Lalita B., Warangka S., Pitisan K., and Somnuk T. "Sodium and Magnesium Sulfate Resistance of Mortars with Interground Limestone and Limestone Powder Replacing Cements," *Journal of Advanced Concrete Technology*, volume 12 (2014), pp. 403-412.