

การต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
ซิลิกาฟุ้ง ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

**SULFATE RESISTANCE OF MORTAR USING FLY ASH, GROUND
GRANULATED BLAST-FURNACE SLAG, SILICA FUME,
LIMESTONE POWDER AND BOTTOM ASH**

อภิชา หนูพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอย
ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

อภิชา หนูพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก
บดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา
Sulfate Resistance of Mortar using Fly Ash, Limestone Powder, Ground
Granulated Blast-Furnace Slag, Silica Fume and Bottom Ash

ชื่อ – นามสกุล นายอภิชา หนูพันธ์

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ามาตร, ปร.ด.

ปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชัย สำราญวานิช, ปร.ด.)

..... กรรมการ

(อาจารย์บุญชัย ผึ้งไผ่งาม, ปร.ด.)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ามาตร, ปร.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 10 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา
ชื่อ - นามสกุล	นายอภิชา หนูพันธ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติศักดิ์ กร้ามาตร, Ph.D.
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GGBS) ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา ซึ่งเป็นวัสดุจากอุตสาหกรรมนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในงานอุตสาหกรรมคอนกรีต

สำหรับการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ในครั้งนี้เป็นการศึกษาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟต ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย GGBS ซิลิกาฟูม และผงหินปูน เพื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ล้วน และมอร์ตาร์แทนที่เถ้าก้นเตาในทรายเพื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้ทรายล้วน

ผลการศึกษาพบว่า การขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย GGBS ซิลิกาฟูม และผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์ OPC ล้วน โดยมีค่าใกล้เคียงหรือน้อยกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย (ที่มี CaO สูง) และผสม GGBS ทั้งที่ผสม 2 และ 3 วัสดุประสานในปริมาณที่น้อย และการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน 2 วัสดุประสาน จะให้ค่าที่มากกว่าหรือใกล้เคียงกับของมอร์ตาร์ OPC ล้วน ส่วนการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ (ทั้งที่ใช้ OPC ล้วน และผสมเถ้าลอย GGBS ซิลิกาฟูม และผงหินปูน) ที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ในทรายจะมีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วน ยกเว้นมอร์ตาร์ที่ผสม GGBS ในปริมาณมากที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ในทราย จะให้ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตมากกว่าของมอร์ตาร์ที่ใช้ทรายล้วน นอกจากนี้การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย GGBS และซิลิกาฟูม มีค่ามากกว่าของมอร์ตาร์ OPC ล้วน ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนทั้ง 2 และ 3 วัสดุประสานมีแนวโน้มน้อยกว่าของมอร์ตาร์ OPC ล้วน สุดท้ายพบว่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ในทราย มีค่ามากกว่าของมอร์ตาร์ที่ใช้ทรายล้วน

คำสำคัญ: มอร์ตาร์ โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต วัสดุจากอุตสาหกรรม

Thesis Title	Sulfate Resistance of Mortar Using Fly Ash, Limestone Powder, Ground Granulated Blast-Furnace Slag, Silica Fume and Bottom Ash
Name - Surname	Mr.Apicha Nhoophan
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
Academic Year	2014

ABSTRACT

This thesis aims to study the effect of binder types on sulfate resistance of mortar using fly ash, ground granulated blast-furnace slag (GGBS), silica fume, limestone powder and bottom ash, which are industrial wastes. The results will utilize these industrial wastes in the concrete industry.

In this study, the study sulfate resistance of mortar immersed in sulfate solutions was studied. The expansion and weight loss of mortars using fly ash, GGBS, silica fume, limestone powder and bottom ash were studied and compared with ordinary Portland cement (OPC) mortar. While, mortar using bottom ash replacement in sand were compared with mortar without bottom ash.

The results show that the expansion in sulfate solution of mortar using fly ash, GGBS, silica fume and limestone powder was less than OPC mortar, however was similar or slightly lower than Type 5 Portland cement mortar. Except the expansion in sulfate solution of mortar using low quantity of high CaO fly ash, low quantity of GGBS (both 2 and 3 binders) and using 2 binders of limestone powder was more than or similarly OPC mortar. Furthermore, the expansion in sulfate solution of mortar (including OPC mortar and mortar using GGBS, silica fume and limestone powder) using bottom ash replacement in sand was lesser than that of mortar without bottom as. Except mortar using high quantity of GGBS, the expansion of mortar without bottom ash. Except mortar using high quantity of GGBS, the expansion of mortar using bottom ash replacement in sand was higher than that of mortar without bottom ash. Moreover, the weight loss in magnesium sulfate solution of mortar using fly ash, GGBS and silica fume was greater than that of OPC mortar. While the weight loss in magnesium sulfate solution of mortar using limestone powder, both of 2 and 3 binders, was tend to be less than the OPC mortar. Finally, mortar using the bottom ash replacement in sand had higher weight loss in magnesium sulfate solution than mortar without bottom ash.

Keywords: fly Ash, sodium sulfate, magnesium sulfate, industrial wastes

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมโยธา แขนงวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนบุรี วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีด้วยความกรุณาและความอนุเคราะห์ของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิติสานต์ กร้ามาตร อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้เสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร. จตุพล ตั้งปกาศิต ประธานกรรมการ ดร. บุญชัย ผึ้งไผ่งาม และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สาราญวานิช กรรมการ ที่ได้ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่อง ต่าง ๆ ของงานวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ และขอขอบคุณ ภาควิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณและมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ น้อง และเพื่อน และ คณาจารย์ที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ

อภิชา หนูพันธ์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานการศึกษา.....	29
3.1 วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา.....	29
3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา.....	35
3.3 การเตรียมสารละลายซิลเฟต.....	38
3.4 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา.....	38
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์.....	44
4.1 การขยายตัว.....	44
4.2 การสูญเสียน้ำหนัก.....	100
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	112
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	112
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	112

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	114
ภาคผนวก.....	117
ภาคผนวก ก การขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์.....	118
ภาคผนวก ข การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์.....	127
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	132
ประวัติผู้จัดทำปริญญานิพนธ์.....	147



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C 618..... 11
ตารางที่ 2.2	ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก.2535-2545..... 11
ตารางที่ 2.3	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ..... 12
ตารางที่ 2.4	องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็ก 14
ตารางที่ 2.5	คุณสมบัติทางกายภาพของหินปูนประเภทโดโลมิติก (Dolomitic) และโดโลไมท์ (Dolomite)..... 17
ตารางที่ 2.6	ข้อแนะนำสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติในสภาวะแวดล้อมซัลเฟต..... 23
ตารางที่ 3.1	ค่าความจำดวงเพาะและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา..... 30
ตารางที่ 3.2	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้ากั้นเตา (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)..... 31
ตารางที่ 3.3	ความถ่วงจำเพาะของเถ้ากั้นเตาและความสามารถในการกักเก็บน้ำของเถ้ากั้นเตา..... 31
ตารางที่ 3.4	สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ โดยน้ำหนัก (กรัม) ที่ใช้ในการศึกษา..... 40
ตารางที่ 3.5	สัดส่วนผสมของวัสดุประสาน โดยน้ำหนัก (กรัม) และเถ้ากั้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียด (โดยปริมาตร) ที่ใช้ในการศึกษา โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก..... 42

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้เตางานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ... 19
รูปที่ 2.2	องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้เตางานวิจัยของ Watcharapong และคณะ.. 19
รูปที่ 2.3	องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้เตางานวิจัยของ Sata และคณะ..... 20
รูปที่ 3.1	ภาพขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถ้าวลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ผงหินปูน และซิลิกาฟูม..... 32
รูปที่ 3.2	เครื่องผสมมอร์ต้าร์..... 33
รูปที่ 3.3	แบบหล่อขึ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. 34
รูปที่ 3.4	แบบหล่อขึ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์แท่งบาร์ขนาด 2.5 x 2.5 x 28.5 ซม. 34
รูปที่ 3.5	เครื่องวัดความยาว (Length Comparator)..... 34
รูปที่ 3.6	เครื่องชั่งดิจิทัล ความละเอียด 0.01 กรัม..... 35
รูปที่ 3.7	ถังสำหรับแช่ขึ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์..... 35
รูปที่ 3.8	ขึ้นตัวอย่างขนาด 2.5 x 2.5 x 28.5 ซม. 36
รูปที่ 3.9	การวัดค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ด้วยเครื่องวัดความยาว (Length Comparator)..... 37
รูปที่ 3.10	ตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. 38
รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียม ซิลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ต้าร์ผสม ถ้าวลอย..... 47
รูปที่ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียม ซิลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ต้าร์ผสม ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด..... 48
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียม ซิลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ต้าร์ผสม ซิลิกาฟูม..... 49

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน.....	50
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย FA ร่วมกับผงหินปูน.....	51
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย FB, FC และ FD ร่วมกับผงหินปูน.....	53
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน.....	54
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูมร่วมกับ ผงหินปูน.....	55
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย.....	58
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด.....	59
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูม.....	60

สารบัญญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียม ซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ตาร์ผสม ผงหินปูน.....	61
รูปที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียม ซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ตาร์ผสมด้วย เกลือ FA ร่วมกับผงหินปูน.....	62
รูปที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียม ซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ตาร์ผสม เกลือ FB, FC และ FD ร่วมกับผงหินปูน.....	63
รูปที่ 4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียม ซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ตาร์ผสม ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน.....	64
รูปที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียม ซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ตาร์ผสม ซิลิกาฟูมร่วมกับผงหินปูน.....	64
รูปที่ 4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียม ซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเกลือ.....	66
รูปที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียม ซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเกลือ.....	67
รูปที่ 4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายซัลเฟตของ ตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน.....	68
รูปที่ 4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายซัลเฟตของ ตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเกลือและมอร์ตาร์ผสมเกลือร่วมกับผงหินปูน.....	71

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างของมอร์ตาร์ทผสมตะกรันเตากลุงเหล็กบดละเอียดและมอร์ตาร์ทผสมตะกรันเตากลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน.....	73
รูปที่ 4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างของมอร์ตาร์ทผสมซิลิกาฟูมและมอร์ตาร์ทผสมซิลิกาฟูมร่วมกับผงหินปูน.....	74
รูปที่ 4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ทผสมผงหินปูน.....	75
รูปที่ 4.24	ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ทที่วัดค่าการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 61 สัปดาห์.....	77
รูปที่ 4.25	ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ทที่วัดค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 61 สัปดาห์.....	79
รูปที่ 4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ทปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนเมื่อใช้ทรายล้วนและมอร์ตาร์ทปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร.....	82
รูปที่ 4.27	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ทผสมถ้ำลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้ทรายล้วนและมอร์ตาร์ทผสมถ้ำลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร.....	84
รูปที่ 4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ทผสมตะกรันเตากลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 และมอร์ตาร์ทผสมตะกรันเตากลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร.....	86

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร.....	88
รูปที่ 4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนเมื่อใช้ทรายล้วนและมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร.....	90
รูปที่ 4.31	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้ทรายล้วนและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร.....	92
รูปที่ 4.32	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 เมื่อใช้ทรายล้วนและมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร.....	94
รูปที่ 4.33	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ตาร์ใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร.....	96
รูปที่ 4.34	ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ที่วัดค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต.....	98
รูปที่ 4.35	ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ที่วัดค่าการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต.....	100
รูปที่ 4.36	การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 61 สัปดาห์.....	102

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.37	การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ทผสมเถ้าลอยที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 61 สัปดาห์.....	103
รูปที่ 4.38	ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ทที่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 61 สัปดาห์	105
รูปที่ 4.39	การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ทเมื่อใช้ทรายล้วนและเมื่อใช้เถ้ากั้นตาแทนที่ในทรายที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตอายุ 50 สัปดาห์.....	107
รูปที่ 4.40	ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ทในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 50 สัปดาห์....	109



บทที่ 1

บทนำ

สำหรับบทนำเป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัญหาสภาวะโลกร้อนและกระแสการอนุรักษ์พลังงานรวมถึงสภาวะการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจปัจจุบัน ทำให้มีการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น เป็นที่ทราบกันดีว่าในการผลิตปูนซีเมนต์ด้วยเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก หากพิจารณาประโยชน์จากการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์โดยเฉพาะกรณีวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่างๆ ย่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ [1] นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตและพัฒนาคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น รวมทั้งสามารถแก้ปัญหาการกำจัดของเสียและช่วยประหยัดพลังงานโดยรวมของประเทศ อาทิเช่น พลังงานที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ พลังงานที่ใช้ลำเลียงผลพลอยได้ไปทิ้งในบ่อกลบฝัง พลังงานที่ใช้ในการระเบิดภูเขาหินปูน และพลังงานที่ใช้ในการขยอหินเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถยืดระยะเวลาในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด ได้ยาวนานยิ่งขึ้นอีกด้วย

โครงสร้างคอนกรีตโดยทั่วไปที่ต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีสารซัลเฟต (SO_4^{2-}) ที่อยู่ในรูปของสารละลายซัลเฟตสามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ ซึ่งจะพบได้ในดินหรือน้ำใต้ดิน น้ำเสียจากบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรม หรือจากโรงงานผลิตสารเคมีบางประเภท และในน้ำทะเลที่มีซัลเฟตเป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างของซัลเฟตที่พบมากในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อคอนกรีต เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) เป็นต้น ความเสียหายจากซัลเฟตที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตนั้น จะเกิดการผุกร่อน พองตัว และแตกร้าวอย่างรุนแรง ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟตและความชื้น ในด้านการต้านทานซัลเฟต จากการสืบค้นผลงานวิจัย [2, 3, 4 และ 5] ซึ่งให้ผลในแนวทางเดียวกัน กล่าวคือการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan

materials) เช่น เถ้าลอยของเตาถ่านหิน ซิลิกาฟุ้ง และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น ในอัตราส่วนที่เหมาะสม สามารถต้านทานซัลเฟตได้ดี อย่างไรก็ตามปัจจัยบางอย่างก็ให้ผลในด้านลบได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์จะดีกว่าไม่มีการแทนที่เมื่อสัมผัสกับสารละลายโซเดียมซัลเฟต แต่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต กลับแย้งว่าเมื่อเทียบกับการไม่แทนที่ [2, 3, 5] เป็นต้น

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการพัฒนาเถ้าลอยจากถ่านหิน (Fly ash) ซึ่งเป็นสารปอซโซลาน มาใช้ในงานคอนกรีตซึ่งเป็นผลผลิตที่เหลือจากการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมาใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน การนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีต ทำให้ความสามารถเทได้ของคอนกรีตดีขึ้นทำให้ลดอุณหภูมิของคอนกรีต ลดความสามารถในการซึมผ่าน อัตราการแพร่กระจายของความชื้นและสารละลายเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตมากขึ้น ลดการกัดกร่อนของซัลเฟต เพิ่มความทนทานและกำลังอัดในระยะยาว ในขณะที่ผงหินปูน (Limestone Powder) เป็นผลพลอยได้จากการย่อยหินเพื่อใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ จากงานวิจัยที่ผ่านมา [6] พบว่ามอร์ตาร์ผสมผงหินปูนมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ผสมสารปอซโซลานหลายชนิด ดังนั้นจึงน่าจะศึกษาค้นคว้าโดยนำข้อดีของผงหินปูนกับเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานมาหาสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการต้านทานซัลเฟตและในขณะที่ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) หรือไมโครซิลิกา (Microsilica) เป็นวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมททัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นกระบวนการรีดักชันจากควอร์ต (quartz) ที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอนสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็วส่วนผสมคอนกรีตต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่าเดิมเนื่องจาก ขนาดอนุภาคที่เล็กมากของซิลิกาฟุ้งอีกทั้งยังมีส่วนประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide) ในปริมาณที่น้อยกว่าวัสดุประสานอื่นๆ จึงสามารถต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตได้และอย่างไรก็ตามในส่วนของตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast-furnace slag) เป็นผลผลิตที่เหลือจากการถลุงเหล็ก ซึ่งเป็นสารปอซโซลานชนิดหนึ่ง รวมทั้งเถ้าก้นเตา (Bottom ash) ก็เป็นผลผลิตที่เหลือจากการผลิตกระแสไฟฟ้าก็น่าจะเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งในการนำมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อต้านทานสิ่งแวดล้อมซัลเฟต เพื่อที่จะหาแนวทางในการป้องกันการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น และเป็นแนวทางที่จะนำไปสู่การพัฒนาต้านคอนกรีตต่อไป

ดังนั้นการศึกษาวิจัยในครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์โดยมุ่งเน้นไปที่ส่วนผสมที่ใช้วัสดุจากอุตสาหกรรม ซึ่งในที่นี้ได้แก่ เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูน มาแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ และเถ้าก้นเตาที่แทนที่บางส่วนในทราย โดยอาจแทนที่วัสดุ

กากอุตสาหกรรมชนิดเดียว หรือเป็นการแทนที่รวมทั้งสองหรือสามชนิดของวัสดุกากดังกล่าว กล่าวคือ จะศึกษาถึงความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสาน มอร์ตาร์ที่ใช้ผง หินปูน ใช้ซิลิกาฟูม ใช้เถ้าลอย ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด หรือใช้ผงหินปูนร่วมกับเถ้าลอย หรือ ผงหินปูนร่วมกับตะกรันเตาถลุงเหล็ก หรือผงหินปูนแทนที่ร่วมกับซิลิกาฟูม แทนที่บางส่วนของวัสดุ ประสาน และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่บางส่วนของทรายโดยทำหน้าที่เป็นวัสดุบ่มภายในมอร์ตาร์ เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของ มอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรมดังกล่าวกับโครงสร้างคอนกรีตที่ สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต และที่น่าจะเป็นประโยชน์สำคัญอีกอย่าง ก็เป็นการนำวัสดุกาก อุตสาหกรรม อย่างผงหินปูนจากการย่อยหิน หรือกากจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าทั้งเถ้าลอย และเถ้ากั้นเตา หรือตะกรันเตาถลุงเหล็กจากกระบวนการถลุงเหล็กมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งเป็นการลด ภาระในการกำจัดทิ้งและสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าว และโดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นการลด ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้ากั้นเตาในสารละลายซัลเฟต

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อความ ต้านทานซัลเฟต ของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน

1.2.3 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของการแทนที่ของเถ้ากั้นเตาในทรายต่อความต้านทาน ซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน

1.2.4 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของชนิดของสารละลายซัลเฟตต่อความต้านทานซัลเฟตของ มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้ากั้นเตา

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 สำหรับการวิจัยเพื่อศึกษาถึงความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตา ถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้ากั้นเตาในครั้งนี้ นั้น ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสาน ดังนี่ยกเว้นในกรณีของเถ้ากั้นเตาที่ใช้แทนที่ในทราย

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5
- 2) แทนที่เถ้าลอย ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 3) แทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 4) แทนที่ซิลิกาฟูมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 5) แทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 6) แทนที่ผงหินปูนร่วมกับเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 7) แทนที่ผงหินปูนร่วมกับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทที่ 1

- 8) แทนที่ผงหินปูนร่วมกับซิลิกาฟูมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1.3.2 สำหรับการวิจัยเพื่อศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียดในครั้งนี้นั้น ตัวอย่างมอร์ต้าที่ใช้ประเมินการต้านทานซัลเฟตจะใช้วัสดุประสานดังนี้

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
- 2) แทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 3) แทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 4) แทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 5) แทนที่เถ้าก้นเตาในทรายของส่วนผสมมอร์ต้า

1.3.3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ของมอร์ต้าใช้เท่ากับ 0.55 ตลอดการศึกษา

1.3.4 การประเมินความต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างแท่งมอร์ต้าที่แช่ในสารละลายซัลเฟต จะประเมินความต้านทานโดยวัดค่าการขยายตัว (Expansion) และการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) ของตัวอย่างมอร์ต้าร่อกว่าคือ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ใช้ประเมินความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้า โดยวัดการขยายตัวของตัวอย่างแท่งมอร์ต้าขนาด $2.5 \times 2.5 \times 28.5$ ซม. อย่างเดียว ขณะที่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ใช้ประเมินความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้า โดยวัดการขยายตัวของตัวอย่างแท่งมอร์ต้าขนาด $2.5 \times 2.5 \times 28.5$ ซม. และวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าขนาด $5 \times 5 \times 5$ ซม. ทั้งนี้เพราะกลไกการทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับกลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีขบวนการที่ไม่เหมือนกัน กล่าวคือกลไกทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะเกิด Ettringite ทำให้เพิ่มการขยายตัว ซึ่งไม่เหมือนกรณีของการทำลายมอร์ต้าของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ทำให้เกิด MSH ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ก็มีการขยายตัวเกิดขึ้นด้วย [7] ด้วยเหตุนี้

ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจึงวัดการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ด้อย่างเดียว ในขณะที่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต มีการประเมินความต้านทานซัลเฟตทั้งวัดการขยายตัวและวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างไปพร้อมๆ กัน

1.3.5 ตามมาตรฐานของ ASTM C 1012 กำหนดให้ใช้ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต (กรณีสารละลายโซเดียมซัลเฟต) เท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยเตรียมสารละลายไว้ล่วงหน้า 1 วันที่อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส ก่อนที่ใช้แช่ตัวอย่าง อัตราส่วนของปริมาตรสารละลายต่อปริมาตรตัวอย่างที่แช่ประมาณ 4: 1

1.3.6 การวิเคราะห์การศึกษาวิจัยของการต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ดที่ใช้เกลือลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา ในครั้งนี้นั้นจะพิจารณาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ดที่แช่ในสารละลายซัลเฟต จากผลกระทบของ 1) ชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานในตัวอย่างมอร์ตาร์ด 2) ชนิดของเกลือลอยในสารละลายซัลเฟต และ 3) การแทนที่เถ้าก้นเตาในทราย

1.3.7 สุดท้ายเป็นการเลือกสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ดที่ใช้เกลือลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตาที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้กับโครงสร้างคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟตต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบถึงการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ดที่ใช้เกลือลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตาในสารละลายซัลเฟต

1.4.2 ได้ทราบถึงผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อความต้านทานซัลเฟต ของมอร์ตาร์ดที่ใช้เกลือลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

1.4.3 ได้ทราบถึงผลกระทบของการแทนที่ของเถ้าก้นเตาในทรายต่อความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ดที่ใช้เกลือลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน

1.4.4 ได้ทราบถึงผลกระทบของชนิดของสารละลายซัลเฟตต่อความต้านทานซัลเฟต ของมอร์ตาร์ดที่ใช้เกลือลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

1.4.5 ได้ทราบถึงแนวทางในการเลือกส่วนผสมของมอร์ตาร์ดที่ใช้เกลือลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา เมื่อเผชิญกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

1.4.6 สามารถนำถ้ำลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง ผงหินปูน และถ้ำกั้นเตา ซึ่งเป็นวัสดุกากอุตสาหกรรม มาทำให้เกิดประโยชน์เป็นการช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม

1.4.7 ได้บทความวิชาการที่สามารถตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมระดับชาติ หรือในวารสารระดับชาติหรือนานาชาติ



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุปอซโซลาน เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

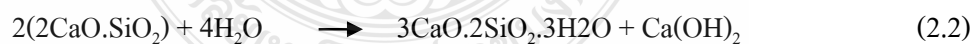
2.1.1 ปฏิกริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

2.1.1.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate, $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ หรือ CH) ดังสมการที่ (2.1)



2.1.1.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลผลิตที่ต่ำกว่าจากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH ดังสมการที่ (2.2)



2.1.1.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต ปฏิกริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดและทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ (2.3)



เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (clinker) โดยยิปซัม(gypsum : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนต ก่อให้เกิดชั้นบางๆของเอตริงไจท์(ettringite: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ca} \cdot \text{SO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต ดังสมการที่ (2.4)



2.1.1.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำให้ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซัม ดังสมการที่ (2.5)



2.1.2 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (pozzolanic materials) คือวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ/หรือเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันเป็นปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุนั้นๆ ถึงแม้ว่าปอซโซลานชนิดนั้นมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ในสัดส่วนผสมใดๆก็ตาม บางครั้งปอซโซลานบางส่วนไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้เนื่องจากองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยามีไม่เพียงพอต่อขบวนการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

2.1.2.1 ชนิดของวัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลานมีสองชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (natural pozzolan) และปอซโซลานดัดแปลง (modify pozzolan) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ได้แก่ หินดินดาน (shales) เศษหินภูเขาไฟ (Tuff) เถ้าภูเขาไฟ (volcanic ash) หินภูมิไซต์ (pumisite) หินโอปอลเหลือง (opaline) หิน

ชั้น (shale) หินเชิร์ต(chert) หินปูน (limestone) ปอชโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเมื่อต้องการนำไปใช้งาน จะต้องนำมาบดก่อน

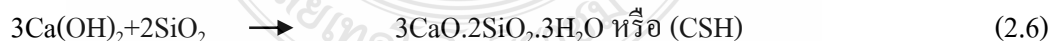
2) ปอชโซลานดัดแปลง

ปอชโซลานดัดแปลง เกิดจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By Products) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอชโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้น โดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบันปอชโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่ เถ้าลอย (fly ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซิลิกาฟุ้ง (silica fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

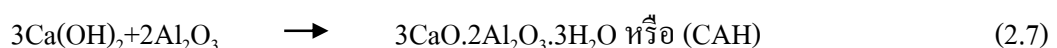
2.1.2.2 ปฏิกริยาปอชโซลานของวัสดุปอชโซลาน

วัสดุปอชโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(CSH) และ/หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต(CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอชโซลาน เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต(CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกริยาปอชโซลาน (pozzolanic reaction) สรุปเป็นสมการทางเคมีได้ ดังสมการที่ (2.6) ถึง (2.7)

ในกรณีที่วัสดุปอชโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ปฏิกริยาปอชโซลานสามารถเขียนเป็นสมการที่ (2.6)



ในกรณีที่วัสดุปอชโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ปฏิกริยาปอชโซลานสามารถเขียนเป็นสมการที่ (2.7)



2.1.3 เถ้าลอย

เถ้าถ่านหิน หรือ เถ้าลอย (fly ash หรือ pulverized) จัดเป็นสารผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์ จำพวกปอซโซลานสังเคราะห์หรือปอซโซลานดัดแปลงประเภทหนึ่ง เป็นผลพลอยได้ (by-product) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงาน ความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (bottom ash) ส่วน ถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึง 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับฝุ่น (electrostatic precipitation) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนเนื่องจากจะเป็น มลภาวะต่อพื้นที่โดยรอบบริเวณโรงไฟฟ้า

2.1.3.1 ชนิดของของเถ้าลอย

มาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

1) เถ้าลอยชนิด F (Class F)

เถ้าลอยชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซค์ และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (silica : SiO_2) และอลูมินา (alumina : Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (ferric oxide : Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 ดังตารางที่ 2.3 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide : CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนียวและควอตซ์ ถ่านหินแอนทราไซค์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี SiO_2 สูง

2) เถ้าลอยชนิด C (Class C)

เถ้าลอยชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 ดังตารางที่ 2.3 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C 618 [8]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์	70.0	50.0
(SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃) อย่างต่ำ, ร้อยละ	5.0	5.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃) อย่างสูง, ร้อยละ	3.0	3.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	6.0	6.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง, ร้อยละ	1.5	1.5
ปริมาณอัลคาไลต์สูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na ₂ O, ร้อยละ		

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ (มอก.) กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก โดยแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมี ได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก.2535-2545 [8]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด			
	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้นคุณภาพ 3
		ชนิด ก	ชนิด ข	
ปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO ₂) อย่างต่ำ, ร้อยละ	30.0	30.0	30.0	30.0
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO), ร้อยละ	-	น้อย	น้อย	-
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃) อย่างมาก, ร้อยละ	5.0	กว่า 10	กว่า 10	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด อย่างมาก, ร้อยละ	3.0	5.0	5.0	2.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างมาก, ร้อยละ	6.0	3.0	2.0	6.0
		6.0	6.0	

เถ้าลอยในประเทศไทยสามารถพบได้ทั้ง Class C และ Class F ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา และลักษณะการเผาของถ่านหิน อย่างไรก็ตามก็ต่างก็มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้งานคอนกรีต เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ มีองค์ประกอบทางเคมีโดย ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ [8]

ตัวอย่าง	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
แม่เมาะ	41.16	22.30	11.51	15.27	2.70	1.43	2.93	1.66	0.20
ระยอง	45.24	28.25	2.43	11.80	0.74	3.63	0.66	0.47	2.96
กาญจนบุรี	39.56	20.99	9.37	10.62	1.47	3.34	3.08	0.30	7.10
ราชบุรี	32.96	13.81	6.69	24.42	1.44	10.56	2.38	0.61	7.05
ปราจีนบุรี	42.03	18.97	4.44	4.91	1.01	19.68	0.28	0.72	3.65

2.1.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) ไอออนออกไซด์ (Fe₂O₃) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก และมี แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไลต์ (Na₂O, K₂O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H₂O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition : LOD) SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักมีปริมาณถึงร้อยละ 80-90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน มาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดผลรวมของ SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ ของเถ้าลอยไว้ร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์นำไปใช้งานได้

2.1.3.3 ปฏิริยาทางเคมี

ปฏิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะเริ่มจากปฏิริยาไฮเดรชัน (hydration) ดังสมการที่ (2.1) ถึง (2.5) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (3CaO.2SiO₂.3H₂O หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂ หรือ CH) หลังจากนั้นวัสดุปอซโซลานในที่นี้คือเถ้าลอย ซึ่งมี

องค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ดังสมการที่ (2.6) หรือสมการที่ (2.7) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) ผลผลิตของปฏิกิริยานี้จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2.1.4 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดนอกจากจะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์แล้วยังใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาวอิมตัว (hydrated lime) ยิบซัม หรือแอนไฮไดรต์ (anhydrite) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถใช้ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมหรือใช้เป็นส่วนผสมแยกต่างหากในการผสมคอนกรีต

ACI 116 ให้คำจำกัดความของตะกรันเตาถลุงเหล็ก (blast-furnace slag) คือผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่โลหะซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิเกตและอลูมิโนซิลิเกตของแคลเซียมและอื่นๆ ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่หลอมละลายพร้อมกับเหล็กในเตาถลุงเหล็ก นอกจากนี้ยังให้คำจำกัดความของเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็ก (granulated blast-furnace slag) หมายถึงเม็ดวัสดุที่ไม่เป็นผลึกซึ่งได้จากการทำตะกรันที่หลอมเหลวในเตาถลุงเหล็กให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มลงในน้ำ

2.1.4.1 องค์ประกอบทางเคมี

ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินาเป็นหลักซึ่งปนมากับสินแร่เหล็กและยังมีออกไซด์ของแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งมาจากหินปูนและหินโดโลไมต์ องค์ประกอบหลักนี้รวมกันแล้วมีมากกว่าร้อยละ 95 นอกจากนี้ยังมีออกไซด์อื่นๆที่ติดมา เช่น SO_3 , Fe_2O_3 และ MnO อยู่เล็กน้อย ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดาใน ค.ศ. 1988 แม้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในตารางที่ 2.4 จะแตกต่างกันมาก แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะแต่ละโรงงาน พบว่ามีค่าแตกต่างกันไม่มาก การที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กมีออกไซด์ของแคลเซียมค่อนข้างสูง (มากกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป) จึงทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสานได้ด้วยตัวเองเมื่อผสมกับน้ำ

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็ก [8]

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)
SiO ₂	32 - 40
Al ₂ O ₃	7 - 16
CaO	32 - 45
MgO	5 - 15
SO ₃	0.7 - 2.2
Fe ₂ O ₃	0.1 - 1.5
MnO	0.2 - 1

2.1.4.2 ข้อกำหนดสำหรับตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ASTM C989 ได้กำหนดตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ คือ ชั้นคุณภาพ 80, 100 และ 120 ซึ่งแต่ละชั้นคุณภาพจะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มีชั้นคุณภาพสูง ข้อกำหนดที่ต้องการของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดของแต่ละชั้นคุณภาพที่แบ่งตาม ASTM C989 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.5 นอกจากนี้ค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันแล้ว มาตรฐาน ASTM ยังได้กำหนดคุณสมบัติอื่นๆเพิ่มเติมด้วย เช่น ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต้องมีปริมาณวัสดุที่ค้างบนตะแกรงขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร (No.325) ไม่เกินร้อยละ 20 ปริมาณฟองอากาศในมอร์ตาร์ที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นวัสดุประสานล้วนไม่เกินร้อยละ 12 ปริมาณของกำมะถันจากซัลไฟด์ (sulfide sulfur) ไม่เกินร้อยละ 2.5 และปริมาณของซัลเฟต (SO₃) ไม่เกินร้อยละ 4.0

2.1.4.3 การทำปฏิกิริยากับน้ำ

เมื่อผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำ จะได้ผลลัพท์เช่นเดียวกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ได้ CSH โดยในกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะได้ CSH มาจาก C₃S เป็นส่วนมาก ส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะได้ CSH มาจาก C₂S เป็นส่วนใหญ่ และ CSH ที่ได้จากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความหนาแน่นสูงกว่ากรณีที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะขึ้นอยู่กับอัตราการแตกตัวและการละลายของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ไม่เป็นผลึก เมื่อสัมผัสกับไอออนของไฮดรอกไซด์ (OH) ซึ่งได้มาจากกระบวนการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ตะกรันเตาถลุงเหล็ก

บดละเอียดจะทำปฏิกิริยาทำให้ได้สาร CSH ซึ่งเพิ่มความแข็งแกร่งให้แก่คอนกรีต นอกจากนี้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดยังสามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไลได้โดยเฉพาะในกรณีของอัลคาไลไฮดรอกไซด์พบว่าไฮดรตของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ได้มีความแข็งแกร่งสูงกว่าไฮดรตที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

- 1) องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
- 2) ความเข้มข้นของด่างอัลคาไลในระหว่างทำปฏิกิริยา
- 3) ปริมาณที่ไม่เป็นผลึกของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
- 4) ความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและปูนซีเมนต์ปอร์ต

แลนด์อุณหภูมิในขณะที่ทำปฏิกิริยา

ปัจจัยเหล่านี้มีผลซึ่งกันและกันจึงเกิดความยุ่งยากในการพิจารณาหาความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ดังนั้น ASTM C989 จึงแนะนำให้ควรรู้ค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันเป็นดัชนีชี้ถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ ส่วนผลสมของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดควรได้รับการทดสอบก่อนเพื่อให้แน่ใจว่าได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติและคุณภาพตามต้องการการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์จะลดอุณหภูมิของคอนกรีตได้เนื่องจากการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลง และทำให้คอนกรีตที่บ่มขึ้นและการซึมผ่านน้ำจะลดลงอย่างมากตามอายุที่เพิ่มขึ้น ยิ่งปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมากจะยิ่งลดการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตได้มากขึ้นเพราะโครงสร้างของโพรงในซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีแนวโน้มที่บ่มขึ้นมากกว่ากรณีของซีเมนต์เพสต์ล้วน

ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตได้ดี การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมี C_3A ถึงร้อยละ 12 ให้ผลการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (C_3A ไม่เกินร้อยละ 5) ซึ่งความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเนื่องจากคอนกรีตมีการซึมผ่านน้ำต่ำ การที่ $Ca(OH)_2$ และอัลคาไลทำปฏิกิริยากับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดได้เป็น CSH จึงเหลืออัลคาไลและ $Ca(OH)_2$ น้อยลงในการทำปฏิกิริยากับซัลเฟต การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถลดการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาของอัลคาไลซิลิกา แต่มักต้องใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณสูงถึงร้อยละ 40 ถึง 65 ของวัสดุประสานจึงจะสามารถลดปัญหานี้ได้ดี

2.1.5 ซิลิกาฟุ้ง

ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) หรือไมโครซิลิกา (Microsilica) หรือซิลิกาฟุ้งควบแน่น (condensed silica fume) เป็นชื่อเรียกวัดคุณสมบัติเพิ่มเติมหนึ่ง ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมททัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นกระบวนการรีดักชันจากควอร์ตซ์ (quartz) ที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอนโดยวิธี electric arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2,000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไอ (Fume) ของ SiO ซึ่งต่อมาจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำได้เป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ขนาดเล็กมากที่ไม่เป็นผลึกและรูปร่างกลม ซิลิกาฟุ้งจะถูกดักจับในตัวดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้

เนื่องจากซิลิกาฟุ้งมีอนุภาคที่เล็กมาก มีพื้นที่ผิวสูงมาก และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก จึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว ปัญหาของการใช้ซิลิกาฟุ้งในงานคอนกรีตคือ ส่วนผสมคอนกรีตต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่าเดิมเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากของซิลิกาฟุ้ง ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงมากจึงต้องการปริมาณน้ำในการหล่อลื่นพื้นที่ผิวของอนุภาคสูงขึ้นด้วย ซิลิกาฟุ้งจากโรงงานโลหะซิลิกอนและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นซิลิกาฟุ้งที่มีคุณภาพดี โดยร้อยละ 61 ถึง 98 ประกอบด้วยซิลิกอน ซึ่งร้อยละ 85 ถึง 95 ของซิลิกอนดังกล่าวอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกหรืออสัณฐานซึ่งมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ส่วนซิลิกาฟุ้งที่ได้จากโรงงานเฟอร์โรซิลิกอนมีคุณภาพต่ำกว่าโดยมีซิลิกอนเพียงประมาณร้อยละ 50 และอยู่ในรูปของผลึกค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลให้เกิดการใช้ซิลิกาฟุ้งเหล่านี้ในงานคอนกรีตไม่มากนัก

2.1.5.1 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟุ้งคือ SiO₂ ซึ่งควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ ซิลิกาฟุ้งที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมี SiO₂ มากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O และออกไซด์อื่นๆ อีกร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของ SiO₂ หากนำค่าออกไซด์ของซิลิกาฟุ้งมาเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ ถ้าผ่านหิน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก จะพบว่ามีส่วนประกอบที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก

2.1.5.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟุ้งที่เห็นชัดเจน คือเป็นฝุ่นผงที่ละเอียดมาก สีเทา เทาดำ หรือเทาอมขาว แต่ถ้าเป็นซิลิกาฟุ้งควบแน่นจะมีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากการรวมตัวของซิลิกาฟุ้งหลายๆอนุภาคเข้าด้วยกัน ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟุ้งมีค่าประมาณ 2.2 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมโครเมตร มีพื้นที่ผิวประมาณ 200,000 ถึง 250,000 ซม./ก. ซึ่งใช้การทดสอบโดยวิธีดูดซับก๊าซไนโตรเจน (nitrogen absorption test) และถือว่ามีค่าสูงมาก (ขณะที่ถ้า

ถ่านหินมีค่าประมาณ 3,000 ถึง 7,000 ซม./ก. ซึ่งทดสอบโดยวิธีเบลน) ขนาดอนุภาคของซิลิกาฟุ้งมีขนาดเล็กมากจึงมีปัญหาในการขนย้าย เพื่อแก้ปัญหานี้จึงมีการนำซิลิกาฟุ้งมาอัดรวมกันเพื่อให้มีซิลิกาฟุ้ง เถ้าถ่านหิน ตะกรับเตาถลุงเหล็ก เถ้าแกลบบด และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2.1.6 ผงหินปูน

ผงหินปูนเป็นผลพลอยได้จากการย่อยหิน เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยปกติแล้วฝุ่นหินปูนจำนวนมากเหล่านี้มักจะถูกกองเก็บไว้ในบริเวณแหล่งหินย่อยๆ โดยอนุภาคของผงหินปูนมีขนาดเล็กอยู่ในช่วงระหว่าง 100 ถึง 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถก่อให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อมและยังส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของผู้ที่อยู่อาศัยในบริเวณใกล้เคียงแหล่งย่อยหินเหล่านั้น ฝุ่นหินปูน (Limestone Powder) ในประเทศไทยมีเหมืองที่ทำการผลิตอยู่ 2 แหล่งใหญ่ด้วยกันคือ เหมืองหินปูนโดโลมิติก จังหวัดสระบุรี และฝุ่นหินปูนจากเหมืองหินปูนชนิดโดโลไมท์ จังหวัดกาญจนบุรี หินปูนชนิดโดโลมิติก (Dolomitic) และโดโลไมท์ (Dolomite) จัดอยู่ในพวกหินคาร์บอเนต (Carbonate Rock) โดยหินคาร์บอเนตที่มีองค์ประกอบของแร่ โดโลไมท์ อยู่ในปริมาณร้อยละ 10 ถึง 50 จะจัดเป็นหินปูนประเภทโดโลมิติก ในขณะที่มีปริมาณของแร่ โดโลไมท์ มากกว่าร้อยละ 50 จะจัดเป็นหินปูนประเภทโดโลไมท์ โดยหินปูนทั้ง 2 ประเภทมีคุณสมบัติทางกายภาพ

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของหินปูนประเภทโดโลมิติก (Dolomitic) และโดโลไมท์ (Dolomite) [9]

คุณสมบัติทางกายภาพ	ประเภทของหินปูน	
	โดโลมิติก	โดโลไมท์
รูปผลึก	Hexagonal/Rhombohedral	Hexagonal/Rhombohedral
ความแข็ง	3.0 - 3.5 (Mohr ' Scale)	3.0 - 3.5 (Mohr ' Scale)
ความถ่วงจำเพาะ	2.65 - 2.75	2.82
สี	สีขาวสีเทาหรือสีชมพู	สีขาวสีเทาหรือสีชมพู
แร่ธาตุที่เจือปน	Fe, Mn, Co, Zn, Mg	Fe, Mn, Co, Zn, Pb

2.1.7 เถ้าก้นเตา

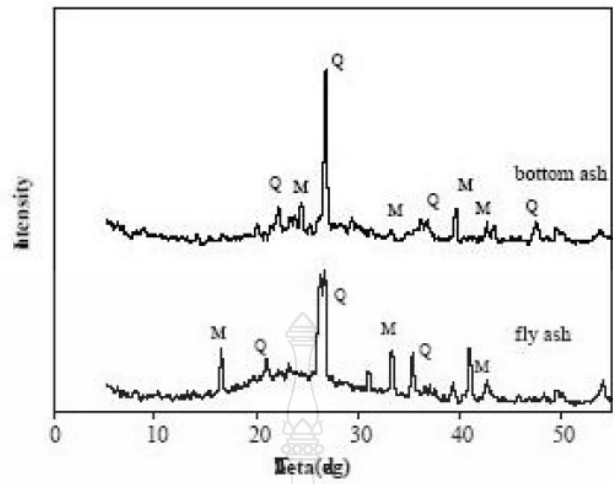
เถ้าก้นเตาหรือเถ้าหนัก (Bottom ash) เป็นเถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่สีเข้ม เกิดจากการจับตัวกันเป็นก้อนหรือเป็นเม็ดของเถ้าถ่านหิน เนื่องจากอุณหภูมิการเผาถ่านหินสูงกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้าถ่านหิน (อุณหภูมิสูงกว่า 1,500 องศาเซลเซียส) จากนั้นเถ้าเหล่านี้จะตกลงยัง

กั้นเตาเนื่องจากมีน้ำหนักมาก สำหรับเถ้ากั้นเตาที่เกิดขึ้นมีปริมาณร้อยละ 15-20 ของปริมาณเถ้าถ่านหินที่เกิดขึ้นทั้งหมดส่วนใหญ่จะนำไปทิ้ง เถ้ากั้นเตาจัดเป็นวัสดุปอซโซลานอย่างหนึ่งเช่นเดียวกับเถ้าลอยเพราะมีปริมาณซิลิกาและอลูมินาสูงในปริมาณที่สูง แต่เนื่องจากเถ้ากั้นเตาส่วนมากจะเป็นเถ้าที่ทิ้งแล้วทำให้มีคุณภาพที่ไม่แน่นอนอย่างมากและอาจจะมีสิ่งเจือปนได้ง่าย

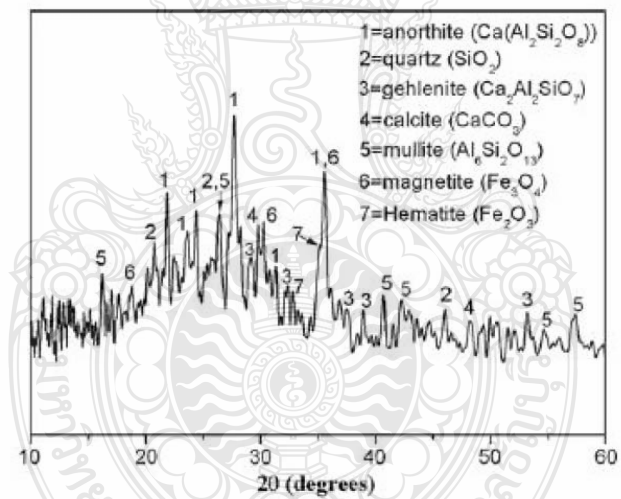
2.1.7.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้ากั้นเตา

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบหลักโดยปกติแล้วองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน คือซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) จะเข้าทำปฏิกิริยากับด่าง คือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ผลที่ได้จากปฏิกิริยาดังกล่าว คือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) โดยทั้ง CSH และ CAH จะทำให้กำลังอัดคอนกรีตหรือปูนซีเมนต์สูงขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ และอัตราการซึมผ่านของน้ำผ่านคอนกรีตลดลงตามไปด้วย

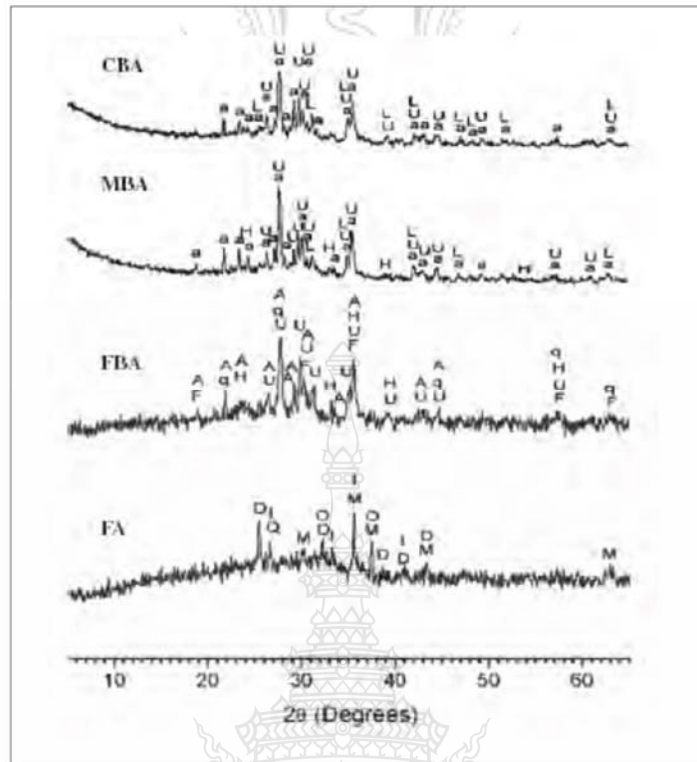
Sathonsaowapark และคณะ[11] ได้ศึกษาการใช้เถ้ากั้นเตาในการผลิตอิฐโพลีเมอร์มอร์ตาร์โดยใช้เถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะของประเทศไทย พบว่าเถ้ากั้นเตามีองค์ประกอบทางเคมี ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 21.3, 13.5, และ 2.1 ตามลำดับ งานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ[12] พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้ากั้นเตาคือซิลิกาหรือ(Quartz) ซึ่งใกล้เคียงกับเถ้าถ่านหิน (Fly ash) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ส่วนรูปที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้ากั้นเตาจากแม่เมาะ ประเทศไทย ที่ได้จากงานวิจัยของ Watcharapong และคณะ[12] ซึ่งมีซิลิกาหรือ(Quartz) เป็นองค์ประกอบหลัก งานวิจัยของ Sata และคณะ[14] ศึกษาความทนทานต่อสารเคมีของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากั้นเตาที่ความละเอียด 3 ขนาด คือ เถ้ากั้นเตาขนาดหยาบ (CBA) ขนาดละเอียดปานกลาง (MBA) และขนาดละเอียดมาก (FBA) ซึ่งพบว่าแม้จะมีความละเอียดที่แตกต่างกันแต่องค์ประกอบทางเคมีไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำกั้นเตางานวิจัยของ Chindapasirt และคณะ [12]



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำกั้นเตางานวิจัยของ Watcharapong และคณะ [13]



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเล้ากันเตางานวิจัยของ Sata และคณะ [14]

2.1.8 กลไกการทำลายของซัลเฟตต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เกลือซัลเฟตจะมีอยู่มากในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในบริเวณริมทะเล หรือในดินทั่วไป เกลือซัลเฟตชนิดที่พบมากที่สุดมักจะเป็นเกลือ โซเดียมซัลเฟต รองลงมาคือแมกนีเซียมซัลเฟต เกลือซัลเฟตยังมักจะอยู่ในน้ำเสีย จากบ้านเรือนหรือตามน้ำพุร้อนธรรมชาติเกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) ที่อยู่ในรูปของสารละลาย สามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ ตัวอย่างของเกลือซัลเฟต ที่พบบ่อยในธรรมชาติและอันตรายต่อคอนกรีต เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) เป็นต้นเกลือซัลเฟตจะมีอยู่มากในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในบริเวณริมทะเล หรือในดินทั่วไป ในน้ำเสีย จากบ้านเรือนหรือตามน้ำพุร้อนธรรมชาติเป็นต้น

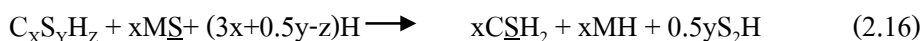
ในการศึกษาเรื่องการทำลายโดยซัลเฟตสามารถทำได้โดยนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ ไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟตหรือแคลเซียมซัลเฟตแต่เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อย ดังนั้นจึงใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตในการศึกษาครั้งนี้

2.1.8.1 กลไกการทำลายของโซเดียมซัลเฟต (Mechanisms of Sodium Sulfate Attacks) [7]กลไกการทำลายของโซเดียมซัลเฟตแสดงดังสมการที่ (2.11) ถึง (2.14) เริ่มต้นเมื่อโซเดียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, CH) ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาจากไฮดรเจน ดังแสดงในสมการที่ (2.6) เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) มีความเป็นด่างสูงมาก (pH=13.5) จึงเป็นการรักษาสภาพทั้งแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต(CSH) และEttringite (C₆ASH₃₂) ไม่ทำให้ปฏิกิริยากลายเป็นผลอื่น โดยที่สารยึดชุ่ม(CSH₂) ที่ได้จากสมการที่ (2.6) จะทำปฏิกิริยากับผลผลิตไฮดรเจนบางตัว เช่น แคลเซียมอลูมินไฮดรต(C₄AH₁₃) โมโนซัลเฟต(C₄ASH₁₂) และไตรแคลเซียมอลูมินไฮดรต (C₃A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮดรเจนทำให้ได้ Secondary Ettringite ดังแสดงในสมการที่ (2.12) ถึง (2.14) โดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลผลิตปฏิกิริยาไฮดรเจนชนิดอื่นมาก จึงทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นการทำลายโซเดียมซัลเฟตจึงเป็นการขยายตัวและแตกร้าวของคอนกรีต ดังสมการที่ (2.11) ถึง (2.14)



2.1.8.2 กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟต (Mechanisms of Magnesium Sulfate Attacks) [7]กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งแสดงในสมการที่ (2.15) ถึง (2.17)จะแตกต่างจากกรณีของโซเดียมซัลเฟต กล่าวคือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MH) หรือ Bruciteมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก และค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่าประมาณ 10.5 ซึ่งมีความเป็นด่างที่ไม่สูง ดังนั้นจึงทำให้ทั้ง C-S-H และEttringite ไม่เสถียรภาพ นอกจากนี้ C-S-H จะถูกทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตดังแสดงในสมการที่ (2.16) จากสมการที่ (2.15) และ (2.16) ทั้ง CSH₂ และ MH จะสะสมมากขึ้นโดย CSH₂ จะถูกสะสมในช่องว่าง(Pores) ของคอนกรีต ส่วน MH จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล(S₂H) ดังแสดงในสมการที่ (2.17) ได้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรต (M-S-H) ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสานเลยดังนั้นการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตจึงเป็นการเปลี่ยน C-S-H เป็น M-S-H การทำลายดังกล่าวทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของซีเมนต์ที่แข็งตัวและจะเกิดการสะสม CSH₂ โดยไม่เกิดการขยายตัวมากดังกรณีการทำลายของโซเดียมซัลเฟต

ดังสมการที่ (2.15) ถึง (2.17)



2.1.8.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายของซัลเฟต

1) สิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟตตลอดจนความเข้มข้นของ ซัลเฟตความทึบน้ำของ คอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตเข้าไปได้ยาก ลดการทำลายชั้นรุนแรง

2) ปริมาณ C_3A และ C_4AF ในปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และ C_4AF น้อยมีแนวโน้มต้านทานการทำลายของซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A และ C_4AF สูง และ ปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วน C_2S และ C_3S ต่ำก็มีความสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น

3) ปริมาณ Ca(OH)_2 ในคอนกรีต ถ้าลดปริมาณของ Ca(OH)_2 ใน คอนกรีต ก็ช่วยลดความรุนแรงลงได้ด้วย วิธีการลด Ca(OH)_2 ในคอนกรีตอาจทำได้โดยใช้สารวัสดุ ปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

2.1.8.4 วิธีการป้องกันการทำลายโดยซัลเฟต

1) ใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และอัตราส่วน C_2S และ C_3S ต่ำ คือ ปูนซีเมนต์ ปอร์ต-แลนด์ประเภทที่ 5

2) การใช้ วัสดุปอซโซลานแทนที่ ปูนซีเมนต์บางส่วนซึ่งช่วยลดปริมาณ บางส่วน ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) รวมทั้งลด C_3A และยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับ คอนกรีตได้ด้วย

3) ลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้ต่ำเพื่อให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้น

4) ออกแบบให้คอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์เฟสตีไม่มากเกินไป

ตารางที่ 2.7 แสดงข้อแนะนำในการออกแบบคอนกรีตที่เจอกับสภาพสิ่งแวดล้อม ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อจะได้ออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตให้เหมาะสมกับสภาวะความ เข้มของสารละลายซัลเฟต โดยคณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการ สาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์

ตารางที่ 2.6 ข้อเสนอแนะสำหรับคอนกรีตน้ำหนักรีดในสภาวะแวดล้อมซัลเฟต [7]

สภาพแวดล้อมซัลเฟต	ซัลเฟตในดินที่ละลายน้ำ (SO ₄ ⁻² ร้อยละ)	ซัลเฟตในน้ำ (PPM)	ประเภทของวัสดุประสาน	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
เบาบาง	0.00 - 0.10	0 - 15	-	-
ปานกลาง	0.10 - 0.20	150 - 1,500	Type 2, Type 1 + สารปอซโซลาน	ไม่สูงเกิน 0.50
รุนแรง	0.20-2.00	1,500-10,000	Type 5	ไม่สูงกว่า 0.45
รุนแรงมาก	มากกว่า 2.00	มากกว่า 10,000	Type 5 + สารปอซโซลาน	ไม่สูงกว่า 0.45

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นจะกล่าวถึงความเป็นไปได้ในการนำผงหินปูนมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอย คุณสมบัติของเถ้าลอย คุณสมบัติของผงหินปูน และตัวแปรที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน รวมทั้งการใช้เถ้าลอยและผงหินปูนในการต้านทานซัลเฟต

Paul (1976) ได้ศึกษาการผสมปูนขาว (lime) กับวัสดุปอซโซลาน (เถ้าแกลบ) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเถ้าแกลบมาใช้ในงานก่อสร้าง โดยทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ปูนขาวผสมกับเถ้าแกลบ เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมกับปูนขาว และเถ้าแกลบ ซึ่งมีการใช้สารผสมเพิ่มคือ โซเดียมอลูมิเนต เพื่อช่วยเพิ่มกำลังรับน้ำหนัก จากผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนเถ้าแกลบต่อปูนขาวที่ทำปฏิกิริยาดีที่สุดในการพัฒนากำลังรับน้ำหนักมีอัตราส่วนเท่ากับ 1 ต่อ 2 นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถนำเถ้าแกลบไปใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์และปูนขาวในการผลิตอิฐบล็อกได้ ซึ่งจะทำให้ต้นทุนลดลงถึงร้อยละ 13 ถึง 34 เมื่อเทียบกับอิฐบล็อกปูนซีเมนต์ผสมทรายที่ปริมาตรเท่ากัน

Wojciech G. (1990) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลและผลกระทบของผงหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมเต็มหรือวัสดุหล่อลื่น (filler) ต่อความต้านทานเกลือซัลเฟต เมื่อพิจารณาผลทางด้านกายภาพ พบว่าเมื่อผสมผงหินปูนลงในคอนกรีตจะส่งผลให้คอนกรีตมีช่องว่าง

ลดลงทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นมากขึ้น ทำให้เกลือซัลเฟตเข้าไปทำลายยากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยให้ปริมาณน้ำอิสระน้อยลงถึงร้อยละ 20 ถึง 25 โดยน้ำหนักของน้ำอิสระที่อยู่ในคอนกรีต

วิศิษฐ์ เชนพันธ์ (2542) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงหินปูนเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบคอนกรีตผสมผงหินปูน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์เป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้นระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายจะเร็วขึ้น เนื่องจากผลของความเร่งทางกายภาพ (physical acceleration) เกิดขึ้นในกรณีที่ผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ ส่งผลให้อนุภาคปูนซีเมนต์กระจายตัวได้ดีขึ้นนอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากความเร่งทางเคมี (chemical acceleration) เพราะผงหินปูนทำให้ค่าความเป็นด่างของน้ำสูงขึ้นทำให้การก่อตัวเร็วขึ้น จากผลการทดลองยังพบอีกว่า ค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากอนุภาคของผงหินปูนเป็นเหลี่ยมมาก อีกทั้งการแทนที่ด้วยผงหินปูนยังทำให้การก่อตัวเร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตผสมผงหินปูนจึงควรผสมสารลดน้ำพิเศษ (superplasticizer)

ปิติ เสรมธากุล (2545) ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ และแนวทางการนำผงหินปูนเพื่อเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ และการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมุ่งหมายเพื่อนำผงหินปูนมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ และ/หรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน ผลจากการศึกษาพบว่าคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุผงที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์มีบทบาทสำคัญต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น หรือเป็นผลมาจากปฏิกิริยาอื่นๆที่เกี่ยวข้อง ซึ่งอาจสรุปได้เป็น 3 ปัจจัยด้วยกัน ปัจจัยแรกคือ ปริมาณร้อยละหรือความเข้มข้นของสารประกอบ ปัจจัยที่สองคือ ความสามารถในการทำปฏิกิริยา และ/หรือความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของสารประกอบ ปัจจัยสุดท้ายคือ ปริมาณความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี สารประกอบด่างที่ได้กล่าวมาได้แก่ ปริมาณร้อยละหรือความเข้มข้นของ ซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ ที่ว่องไวและอยู่ในสภาพที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ ซึ่งอาจมีแคลเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งในการทำปฏิกิริยาด้วย ซึ่งจากการทดสอบพบว่าปริมาณสารประกอบแมกนีเซียมออกไซด์ในสัดส่วนผสมระหว่างร้อยละ 0.5 ถึง 3.0 มีผลให้การพัฒนากำลังในช่วง 7 วันแรกดีขึ้น นอกจากนี้ยังสรุปแนวทางการประยุกต์ใช้ผงหินปูน และ/หรือผงหินปูนร่วมกับวัสดุปอซโซลานในงานประเภทต่างๆ ดังนี้

1) อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ประยุกต์ใช้โดย ใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัตถุดิบ ใช้บดหรือผสมรวมภายหลังเพื่อผลิตมอร์ตาร์สำเร็จรูป และ/หรือเพื่อการผลิตปูนซีเมนต์ราคาถูกลงที่เหมาะสมแก่ งานก่อสร้างขนาดเล็ก (dry mortar and/or economic – mixed cement)

2) อุตสาหกรรมผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ ประยุกต์ใช้โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณน้อยไม่เกินร้อยละ 35 เพื่อให้ทำหน้าที่วัสดุเติมเต็ม และ/หรือให้คุณสมบัติในการเชื่อม

ประสานในภายหลัง (filler and/or cementitious replacement material) หรืออาจใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก กล่าวคือปริมาณเกินกว่าร้อยละ 35 เพื่อให้ได้คุณสมบัติบางประการ เช่น คุณสมบัติคอนกรีตความร้อนต่ำ เป็นต้น

3) ประยุกต์ใช้งานในฐานะวัสดุปรับปรุงเสถียรภาพชั้นดินอ่อนและงานดินถมบดอัด

ศุภชัย อำนวยพรเลิศ (2547) ได้ทำศึกษาผลของผงหินปูน และเถ้าลอยที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต โดยกำหนดปริมาณการแทนที่ผงหินปูน และ/หรือเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 18 ถึง 36 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.24, 0.27 และ 0.30 อัตราส่วนปริมาณเพสต์ต่อปริมาณช่องว่างต่ำสุดของมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.10, 1.20 และ 1.30 และค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตเท่ากับ 6.0 ± 2.0 ซม. จากผลการทดลองพบว่า หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมผงหินปูน และ/หรือเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา เมื่อสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังรับแรงอัดที่อายุเริ่มต้นจนถึง 28 วัน มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันขึ้นไปจะให้กำลังเทียบเท่ากับคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมที่มีการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตผสมผงหินปูน และ/หรือเถ้าลอย มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา และมาตรฐาน ACI 318

Cengiz Duran Atis, Alaettin Kilic and Umur Korkut Sevim (2002) ได้ศึกษากำลังรับแรงอัดและการหดตัวแห้งของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่มีแคลเซียมออกไซด์สูง โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.40 จากผลการศึกษาพบว่า การผสมเถ้าลอยทำให้การหดตัวแห้งลดลงประมาณร้อยละ 40 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน และกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 10 และ 20 ให้ค่าเทียบเท่ากับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน

P. Chindaprasirt, P. Kanchanda, A. Sathonsaowaphak and H.T. Cao (2005) ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมปอซโซลาน (เถ้าลอยชนิด F และเถ้าแกลบ) ใช้อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ตัวอย่างที่ใช้วัดการขยายตัวจะถูกแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 และทำการตรวจสอบค่า pH ของสารละลาย จากการศึกษาพบว่า เถ้าลอยและเถ้าแกลบช่วยลดการขยายตัวของมอร์ตาร์ และค่า pH นอกจากนี้ยังพบว่า เถ้าแกลบมีประสิทธิภาพมากกว่าเถ้าลอย จากผลการทดสอบ SEM ที่ผิวตัวอย่างที่แตกร้าวหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตชี้ให้เห็นว่าการทำลายโดยซัลเฟตของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอย หรือเถ้าแกลบถูกยับยั้งโดยการลดแคลเซียมออกไซด์ และอัตราส่วน C/S ของ CSH เจล เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนพบว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบมีแคลเซียมซัลเฟตน้อยกว่า และเกิดแอททริงใจที่น้อยกว่าอย่างชัดเจน เช่นเดียวกันกับในกรณีมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยก็จะน้อย

กว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมียังคงมีมากกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยปอซโซลานทั้งสองชนิดนี้ในอัตราการแทนที่ถึงร้อยละ 40 เพื่อสร้างซีเมนต์ผสมที่มีความต้านทานซัลเฟตดี

E.F. Irassar (2005) ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตเมื่อผงหินปูนถูกใช้เป็นส่วนประกอบในปูนซีเมนต์ หรือถูกใช้แทนที่ทรายในคอนกรีตไหลเข้าแบบง่าย (SCC) โดยศึกษาตัวอย่าง เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต ซึ่งถูกแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (NaSO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ที่มีความเข้มข้นต่างๆกัน และที่อุณหภูมิต่างๆกัน โดยใช้ปูนซีเมนต์มีองค์ประกอบต่างๆกัน นอกจากนี้ส่วนผสมและอัตราการแทนที่ผงหินปูนยังถูกออกแบบให้แตกต่างกันอีกด้วย จากผลการศึกษาพบว่า การเสื่อมสภาพเนื่องจากซัลเฟตส่วนใหญ่ส่งผลมาจากอัตราส่วน W/C และปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ การแตกร้าวของผิวถูกควบคุมโดยการใช้อัตราส่วน W/C ต่ำ และมีปริมาณ C_3A ต่ำ ในส่วนสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตพบว่าอุณหภูมิต่ำส่งผลให้เพิ่มระดับความเสื่อมสภาพมากขึ้น

Kamile Tosun, Burak F., B. Baradan and I. Akin Altun (2009) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผงหินปูน ตัวอย่างถูกเตรียมด้วยปูนซีเมนต์ 2 ชนิดซึ่งอัตราส่วน $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$ ต่างกัน ใช้อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5, 10, 20 และ 40 ตัวอย่างจะถูกแช่ในสารละลายซัลเฟต 3 สถานะคือ โซเดียมซัลเฟต (NaSO_4) ที่อุณหภูมิ 20°C และ 5°C แมกนีเซียมออกไซด์ (MgSO_4) ที่อุณหภูมิ 5°C ผลจากการทดสอบชี้ให้เห็นว่า อัตราส่วนการแทนที่ผงหินปูนและอุณหภูมิที่ต่ำส่งผลเสียต่อความต้านทานซัลเฟต นอกจากนี้ปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วน $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$ สูงมีแนวโน้มถูกซัลเฟตทำลายง่ายโดยจะถูกทำลายมากขึ้นเมื่อมีปริมาณผงหินปูนเพิ่มขึ้นในตัวอย่างที่มีอัตราการแทนที่ผงหินปูนสูง การทดสอบ XRD และ SEM/EDS แสดงให้เห็นว่าเอททริงไจท์เป็นผลผลิตที่ส่งผลเสียต่อตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตส่วนยิปซัม และ เทอว์มาไซต์ (thaumasite) เป็นผลผลิตที่ส่งผลเสียต่อตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ (2548) ได้ศึกษาผลกระทบของความละเอียด รูปร่างของเถ้าลอยและวัสดุเฉื่อย ต่อกำลัง ขนาดโพรง การกระจายขนาดโพรง และการซึมผ่านอากาศในเพสต์ที่แข็งตัวแล้ว ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยนำเถ้าลอยทั้งที่ไม่ได้แยกขนาด และแยกขนาดมาแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.35 จากการศึกษาพบว่าเพสต์ผสมเถ้าลอยคัดขนาดให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าเพสต์ผสมเถ้าลอยที่ไม่คัดขนาด การแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยไม่ได้คัดขนาดในอัตราการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เพสต์มีปริมาณโพรงทั้งหมดเพิ่มขึ้นแต่ขนาดโพรงโดยเฉลี่ยจะลดลง ส่วนการ

แทนที่ด้วยถ้ำลอยขนาดเล็กจะส่งผลให้ทั้งปริมาณโพรงทั้งหมด และขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลง เมื่อตรวจสอบปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์พบว่า การแทนที่ถ้ำลอยที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในเพสต์ลดลงมากกว่าการแทนที่ด้วยถ้ำลอยที่ใหญ่กว่า นอกจากนี้ยังศึกษาเพสต์ที่ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.35 และเพสต์ที่ควบคุมให้มีปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติ ใช้ถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และโรงไฟฟ้า COCO มาคัดแยก 3 ตัวอย่างคือ ถ้ำลอยที่ไม่คัดแยกขนาด ถ้ำลอยที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0-45 และ 0-10 ไมครอน ใช้ทรายแม่น้ำที่บดให้มีขนาดใกล้เคียงกับถ้ำลอย โดยนำถ้ำลอยหรือทรายแม่น้ำแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าปริมาณโพรงของเพสต์ถ้ำลอยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการแทนที่ถ้ำลอยเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ถ้ำลอยขนาดเล็กจะส่งผลให้ปริมาณโพรงลดลง การซึมผ่านอากาศในเพสต์จะลดลงเมื่อปริมาณถ้ำลอยเพิ่มขึ้นและใช้ถ้ำลอยมีความละเอียดขึ้น นอกจากนี้พบว่าเพสต์ที่ผสมถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้า COCO มีปริมาณโพรงและการซึมผ่านอากาศสูงกว่าเพสต์ที่ผสมถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เนื่องจากถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้า COCO มีรูปร่างเป็นเหลี่ยม มีความพรุนและความเป็นผลึกมากกว่า ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานน้อยกว่า นอกจากนี้แล้วยังพบว่า เพสต์ผสมวัสดุเนื้อหยาบที่มีขนาดเล็กจะส่งผลให้ปริมาณโพรงลดลงมากกว่าการผสมด้วยวัสดุเนื้อหยาบกว่า และเมื่อเทียบระหว่างการแทนที่ด้วยวัสดุเนื้อหยาบและถ้ำลอยแม่เมาะที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน และที่อัตราการแทนที่เดียวกันพบว่า ปริมาณโพรงและการซึมผ่านอากาศของเพสต์ผสมวัสดุเนื้อหยาบสูงกว่าเพสต์ผสมถ้ำลอยแม่เมาะ ทั้งนี้เนื่องจากถ้ำลอยแม่เมาะเป็นวัสดุปอซโซลานจึงสามารถลดขนาดโพรงจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกและผลจากการอัดตัวแน่นของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ขณะที่วัสดุเนื้อหยาบสามารถลดปริมาณโพรงได้เนื่องจากการอัดตัวแน่นของอนุภาคที่มีขนาดเล็กเท่านั้น

ปิติสานต์ กร้ามาตร และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล (2549) [10] ได้ศึกษาการด้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ส่วน มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ส่วน และมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยถ้ำลอย โดยใช้ถ้ำลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แตกต่างกันสองระดับคือร้อยละ 8.28 และร้อยละ 17.28 จากการศึกษาพบว่า การขยายตัวเมื่อแช่ทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต รวมทั้งการลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยถ้ำลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 ให้ค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ส่วน แต่การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้ค่าสูงกว่าในทางกลับกันมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยถ้ำลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 ส่งผลให้การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักแย่งกว่าเดิม แต่จะช่วยให้ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตทั้งสอง

ชนิดลดลง การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 จะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น การใช้เถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่การลดลงจะไม่มีผลกระทบเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 นอกจากนี้ยังพบว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ค่าการขยายตัว ค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัด และค่าการสูญเสียน้ำหนักจะเป็นสัดส่วนกัน อย่างไรก็ตามในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีเพียงค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนักที่เป็นสัดส่วนกัน แต่การขยายตัวจะมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนัก

ศักดิ์ประยูทธ สินธุภิญโญและสุรัชย์ วัชรตันชัย (2552) ได้ตรวจสอบคุณสมบัติของผลผลิตปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่ผสมผงหินปูน เพื่อศึกษาโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจากการศึกษาพบว่าผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน และกลไกการเกิดปฏิกิริยามีข้อแตกต่างกัน โดยปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนทำให้เกิดเฟส Monocarboaluminate ซึ่งไม่พบในปูนซีเมนต์ปกติเกิด Nucleation Effect ในระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดการเติมเต็มช่องว่างและการอัดตัวแน่น (filling/packing effect) ของผงหินปูนระหว่างเนื้อปูนซีเมนต์ ซึ่งจากผลทั้งสามส่วนดังกล่าวเป็นสาเหตุให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ในระยะต้นสูงกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามประโยชน์ที่ได้จากการหินปูนบดละเอียดนี้จะอยู่ในช่วงต้นของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเท่านั้น และข้อควรระวังในการใช้ผงหินปูนในปริมาณมากอาจจะทำให้เกิด false set ในปูนซีเมนต์ได้

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

สำหรับในบทนี้จะได้กล่าวถึง วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา รายละเอียดวิธีการศึกษา การเตรียมสารละลายซัลเฟต และสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษาโดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัยสำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ประกอบไปด้วย

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งมีคุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.เล่ม 1-2532 หรือมาตรฐานอเมริกา ASTM C150
- 2) เถ้าลอย (Fly Ash) ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง จำนวน 3 ชนิด คือ FA, FB และ FC และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า จังหวัดระยอง BLCF อีก 1 ชนิด คือ FD
- 3) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground Granulated Blast-furnace Slag)
- 4) ซิลิกาฟูม (Silica Fume)
- 5) ผงหินปูน (Limestone Powder) ขนาดความละเอียด 8 ไมโครเมตร
- 6) เถ้าก้นเตา (Bottom ash) ใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง จำนวน 3 ชนิด คือ BA1, BA2 และ BA3
- 7) ทราย ใช้ทรายร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆแล้ว
- 8) สารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการศึกษานี้ใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)
- 9) น้ำที่ใช้ในการผสมใช้น้ำประปา

ตารางที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ส่วนตารางที่ 3.2 และ 3.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความสามารถในการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตา ตามลำดับ ในขณะที่รูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้

ตารางที่ 3.1 ค่าความจำถ่วงเพาะและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

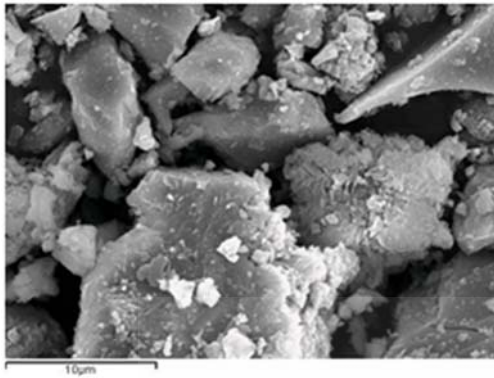
องค์ประกอบ ทางเคมี (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5	เถ้าลอย				ตระกรัน		
			แม่เมาะ		BLCP		เตาถลุง เหล็ก	ซิลิกา ฟุ่ม	ผง หินปูน
			FA	FB	FC	FD			
SiO ₂	18.93	20.97	35.71	26.61	25.22	61.46	34.06	92.00	0.45
Al ₂ O ₃	5.51	3.49	20.44	13.60	13.88	20.27	16.27	0.70	0.05
Fe ₂ O ₃	3.31	4.34	15.54	18.34	17.39	5.56	1.7	1.20	0.03
CaO	65.53	63.86	16.52	24.97	26.25	1.73	36.05	0.20	55.2
MgO	1.24	3.33	2.00	2.33	2.38	0.96	7.38	0.20	0.34
Na ₂ O	0.15	2.12	1.15	1.75	1.40	0.73	2.16	-	< 0.01
K ₂ O	0.31	0.12	2.41	1.77	1.92	1.36	0.21	-	< 0.01
SO ₃	2.88	0.47	4.26	8.53	9.44	0.38	1.09	1.50	0.01
LOI	-	1.44	0.49	0.53	0.56	5.38	1.44	-	43.12
Free lime	1.00	1.01	1.71	3.93	3.06	0.03	-	-	-
ความ ถ่วงจำเพาะ	3.12	3.18	2.53	2.35	2.61	2.22	2.96	2.32	2.69
ความละเอียด โดยวิธีเบลน, ชม. ³ /ก.	3100	2727	2867	2820	2722	2723	4600	-	5210

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำกั้นเตา

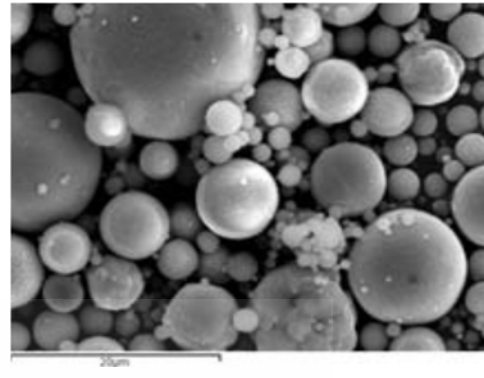
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	BA1	BA2	BA3
SiO ₂	35.29	30.81	20.76
Al ₂ O ₃	18.93	12.95	10.38
Fe ₂ O ₃	15.53	16.94	18.32
CaO	17.44	23.32	31.93
MgO	1.97	2.07	2.32
Na ₂ O	2.02	4.44	7.71
K ₂ O	0.66	0.81	1.79
SO ₃	2.07	1.53	1.35
LOI	4.45	5.43	4.90
Free lime	0.17	1.33	1.50

ตารางที่ 3.3 ความถ่วงจำเพาะ และความสามารถในการกักเก็บน้ำของถ้ำกั้นเตา

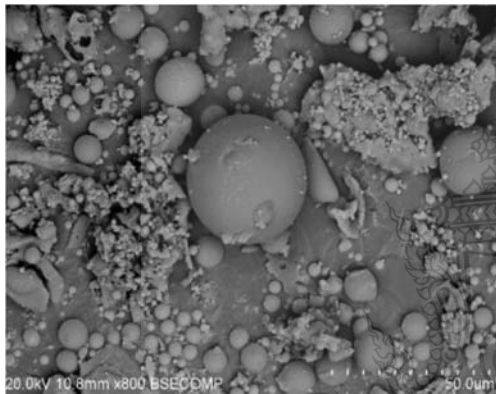
ชนิด	ความถ่วงจำเพาะ	ความสามารถในการกักเก็บน้ำ (ร้อยละ)
BA1	1.76	27
BA2	2.13	21
BA3	1.94	32



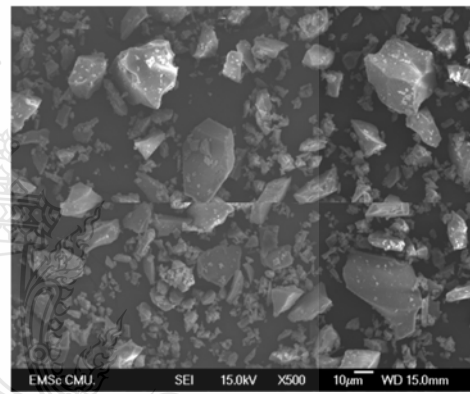
ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



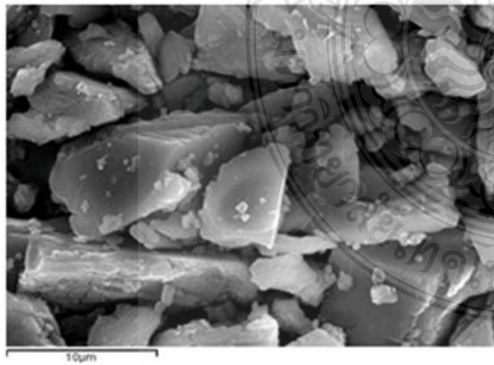
ข) เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (FA)



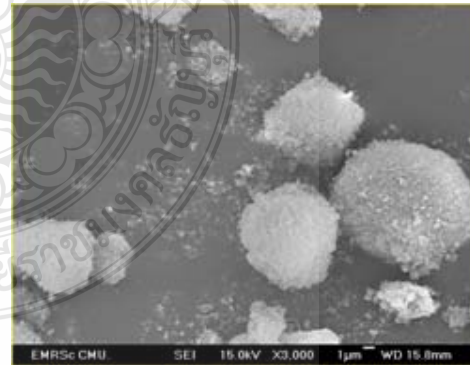
ค) เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจังหวัดระยอง (FD)



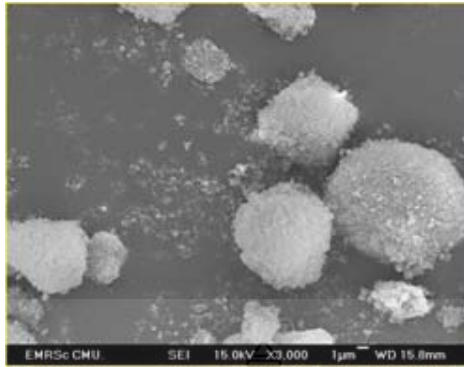
ง) ตะกรันเตาหลอมเหล็กบดละเอียด



จ) ผงหินปูน (8 ไมโครเมตร)



ฉ) ซิลิกาฟูม



ข) ถั่วกั้นเตา (BA1)

รูปที่ 3.1 ภาพขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถั่วลอย ตะกรันเตาถูกล้าง ผงหินปูน และซิลิกาฟูม

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา สำหรับเครื่องมืออุปกรณ์ที่สำคัญ ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ มีดังนี้

1) เครื่องผสมมอร์ต้าร์ (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 เครื่องผสมมอร์ต้าร์

2) แบบหล่อขึ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 แบบหล่อขึ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม.

3) แบบหล่อขึ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์แท่งบารี่ขนาด 2.5 x 2.5 x 28.5 ซม. (รูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 แบบหล่อขึ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์แท่งบารี่ขนาด 2.5 x 2.5 x 28.5 ซม.

4) เครื่องวัดความยาว (Length Comparator) (รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความยาว (Length Comparator)

5) เครื่องชั่งดิจิทัล ความละเอียด 0.01 กรัม (รูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 เครื่องชั่งดิจิทัล ความละเอียด 0.01 กรัม

6) ถังสำหรับแช่ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ (รูปที่ 3.7)



รูปที่ 3.7 ถังสำหรับแช่ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์

3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับรายละเอียดของวิธีการศึกษาได้ทำการทดสอบคุณสมบัติด้านการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์เมื่อใช้วัสดุประสานที่ต่างชนิดกัน โดยทำการประเมินความต้านทานซัลเฟตใน 2 ลักษณะซึ่งได้แก่ การขยายตัว (Expansion) และการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss)

3.2.1 การทดสอบการขยายตัวของมอร์ต้าร์

ในการประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยวัดการขยายตัวของตัวอย่างแท่งมอร์ต้าร์นั้น ในการศึกษาครั้งนี้ จะวัดการขยายตัวของทั้งตัวอย่างแท่งมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยใช้ตัวอย่างแท่งมอร์ต้าร์ขนาด $2.5 \times 2.5 \times 28.5$ ซม.³. หลังจากหล่อลงแบบตัวอย่าง (Mold) แล้วหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อกันน้ำระเหยออกจากตัวอย่าง

ตัวอย่างจะถอดแบบที่อายุ 1 วัน แล้วนำไปแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (Saturated lime water) เป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งได้แยกเตรียมไว้ เพื่อทำการทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างแท่งมอร์ต้าที่อายุต่างๆ สำหรับสารละลายซัลเฟต จะมีการเปลี่ยนที่อายุทุก ๆ 2 เดือนของการแช่ตัวอย่าง

ในส่วนวิธีการวัดการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าที่แช่ในสารละลายซัลเฟต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 1012 โดยหลังจากแช่ตัวอย่างในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (Saturated lime water) เป็นเวลา 28 วัน ทำการวัดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดความยาว (length comparator) ตามมาตรฐาน ASTM C 490 ต่อจากนั้นนำตัวอย่างแช่ในสารละลายซัลเฟต แล้วทำการวัดความยาวของตัวอย่างที่อายุ 2, 3, 4, 8, 13 และ 16 สัปดาห์ และ ทุก ๆ อายุ 2 เดือนของการแช่ในสารละลายซัลเฟต สำหรับการขยายตัวของตัวอย่างเป็นการเฉลี่ยการขยายตัว 4 แท่งตัวอย่างมอร์ต้า ค่าการขยายตัวของตัวอย่างคำนวณ ดังสมการที่ (3.1)

$$\text{การขยายตัว (\%)} = [(L_t - L_i) / L_i] \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่ L_i คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างหลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน (มม.)

L_t คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของตัวอย่างหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟต (มม.)



รูปที่ 3.8 ชิ้นตัวอย่างขนาด 2.5 x 2.5 x 28.5 ซม.



รูปที่ 3.9 การวัดค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ด้วยเครื่องวัดความยาว (length comparator)

3.2.2 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์

ในการประเมินการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าร์ ในการศึกษาครั้งนี้ นั้น จะวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเท่านั้น โดยใช้ตัวอย่าง ลูกบาศก์มอร์ต้าร์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม.³ หลังจากหล่อลงแบบตัวอย่าง (Mold) แล้วหุ้มด้วยแผ่น พลาสติกเพื่อกันน้ำระเหยออกจากตัวอย่าง ตัวอย่างจะถอดแบบที่อายุ 1 วัน

ในส่วนการวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าร์ ในสารละลาย ซัลเฟตนั้น โดยหลังจากถอดแบบที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์ 1 วัน แล้วนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 28 วัน หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 20°C แล้ว นำชิ้นตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าร์ ของแต่ละสัดส่วนผสมซึ่งน้ำหนักโดยเป็นน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าร์ หลังจาก ซึ่งน้ำหนักเสร็จแล้ว นำตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าร์ แชในสารละลายซัลเฟต เมื่อครบอายุที่ต้องการวัด การสูญเสียน้ำหนัก นำตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าร์ มาชั่งผิวด้วยแปรงเพื่อให้เศษมอร์ต้าร์ ที่เสื่อมสภาพ เนื่องจากการทำลายโดยสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตหลุดออกต่อจากนั้น นำตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าร์ ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อนำค่าไปหาการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าร์ เนื่องจาก สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตโดยสามารถหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าร์ได้ ดังสมการที่ (3.2)

$$\text{การสูญเสียน้ำหนัก (\%)} = [(W_i - W_x) / W_i] \times 100 \quad (3.2)$$

โดย W_i คือ ค่าน้ำหนักเริ่มต้น

W_x คือ ค่าน้ำหนักที่อายุต่างๆที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม.

3.3 การเตรียมสารละลายซัลเฟต

สำหรับสารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ได้ใช้ 2 สารละลายซัลเฟต ได้แก่ สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

3.3.1 สารละลายโซเดียมซัลเฟต ใช้ โซเดียมซัลเฟตเท่ากับ 50 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตรซึ่งให้ปริมาณของอ็อกไซด์ซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33,800 ppm

3.3.2 สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตใช้ แมกนีเซียมซัลเฟตเท่ากับ 42.36 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ปริมาณของอ็อกไซด์ซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33,800 ppm

3.4 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ใ้ล้อย ตะกรันเตากลึงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียด โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วน

3.4.2 ใ้ล้อยทั้ง 4 ชนิด แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก

3.4.3 ตะกรันเตากลึงเหล็กบดละเอียด แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก

3.4.4 ซิลิกาฟูม แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 5 และ ร้อยละ 10 โดย น้ำหนัก

3.4.5 ผงหินปูน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 5 และ 10 โดย น้ำหนัก

3.4.6 แก้วลอยทั้ง 4 แทนที่ร้อยละ 10 และแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.4.7 แก้วลอยทั้ง 4 แทนที่ร้อยละ 10 และแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.4.8 แก้วลอยทั้ง 4 แทนที่ร้อยละ 35 และแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.4.9 แก้วลอยทั้ง 4 แทนที่ร้อยละ 30 และแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.4.10 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ร้อยละ 25 และแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.4.11 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ร้อยละ 20 และแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.4.12 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ร้อยละ 45 และแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.4.13 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ร้อยละ 40 และแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.4.14 ซิลิกาฟูม แทนที่ร้อยละ 5 และแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

3.4.15 ซิลิกาฟูม แทนที่ร้อยละ 5 และแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

3.4.16 แก้วกั้นเตาแทนที่ในทรายในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตรในขณะที่ วัสดุประสานใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

3.4.17 แก้วกั้นเตาแทนที่ในทรายในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร ในขณะที่ วัสดุประสานใช้ล้อยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

3.4.18 แก่กั้นเตาแทนที่ในทรายในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร ในขณะที่วัสดุประสานใช้ผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

3.4.19 แก่กั้นเตาแทนที่ในทรายในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร ในขณะที่วัสดุประสานใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

3.4.20 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55

3.4.21 อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 โดยน้ำหนัก

โดยรายละเอียดของสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษาแสดง โดยตารางที่ 3.4 แสดงสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ส่วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ในขณะที่ตารางที่ 3.5 แสดงสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ผสมแก่กั้นเตา

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์โดยน้ำหนัก (กรัม) ที่ใช้ในการศึกษา

ที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์		เถ้าลอย	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก บดละเอียด	ซิลิกา ฟูม	ผง หินปูน (8 μ)	น้ำ	ทราย
		ประเภท ที่ 1	ประเภท ที่ 5						
1	C1	1.00	-	-	-	-	-	0.55	2.75
2	C5	-	1.00	-	-	-	-	0.55	2.75
3	C1-20FA	0.80	-	0.20	-	-	-	0.55	2.75
4	C1-40FA	0.60	-	0.40	-	-	-	0.55	2.75
5	C1-30SL	0.70	-	-	0.30	-	-	0.55	2.75
6	C1-50SL	0.50	-	-	0.50	-	-	0.55	2.75
7	C1-5LP	0.95	-	-	-	-	0.05	0.55	2.75
8	C1-10LP	0.90	-	-	-	-	0.10	0.55	2.75
9	C1-15FA-5LP	0.80	-	0.15	-	-	0.05	0.55	2.75
10	C1-10FA-10LP	0.80	-	0.10	-	-	0.10	0.55	2.75
11	C1-35FA-5LP	0.60	-	0.35	-	-	0.05	0.55	2.75
12	C1-30FA-10LP	0.60	-	0.30	-	-	0.10	0.55	2.75
13	C1-25SL-5LP	0.70	-	-	0.25	-	0.05	0.55	2.75

ตารางที่ 3.4 (ต่อ)

ที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์		ถั่วลอย	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก บดละเอียด	ซิลิกา ฟูม	ผง หินปูน (8 μ)	น้ำ	ทราย
		ประเภท ที่ 1	ประเภท ที่ 5						
14	C1-20SL-10LP	0.70	-	-	0.20	-	0.10	0.55	2.75
15	C1-45SL-5LP	0.50	-	-	0.45	-	0.05	0.55	2.75
16	C1-40SL-10LP	0.50	-	-	0.40	-	0.10	0.55	2.75
17	C1-5SF	0.95	-	-	-	0.05	-	0.55	2.75
18	C1-10SF	0.90	-	-	-	0.10	-	0.55	2.75
19	C1-5SF-5LP	0.90	-	-	-	0.05	0.05	0.55	2.75
20	C1-10SF-5LP	0.85	-	-	-	0.10	0.10	0.55	2.75
21	C1-20FB	0.80	-	0.20	-	-	-	0.55	2.75
22	C1-20FC	0.80	-	0.20	-	-	-	0.55	2.75
23	C1-20FD	0.80	-	0.20	-	-	-	0.55	2.75
24	C1-40FB	0.60	-	0.40	-	-	-	0.55	2.75
25	C1-40FC	0.60	-	0.40	-	-	-	0.55	2.75
26	C1-40FD	0.60	-	0.40	-	-	-	0.55	2.75
27	C1-15FB-5LP	0.80	-	0.15	-	-	0.05	0.55	2.75
28	C1-15FC-5LP	0.80	-	0.15	-	-	0.05	0.55	2.75
29	C1-15FD-5LP	0.80	-	0.15	-	-	0.05	0.55	2.75
30	C1-30FB-10LP	0.60	-	0.30	-	-	0.10	0.55	2.75
31	C1-30FC-10LP	0.60	-	0.30	-	-	0.10	0.55	2.75
32	C1-30FD-10LP	0.60	-	0.30	-	-	0.10	0.55	2.75

ตารางที่ 3.5 สัดส่วนผสมของวัสดุประสาน โดยน้ำหนัก (กรัม) และแก้วกันเตาแทนที่ในมวลรวม
ละเอียด (โดยปริมาตร) ที่ใช้ในการศึกษา โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)
เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก

ที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ตะกรันเตา		แก้วกันเตา (โดยปริมาตร ของทราย)
				ถลุงเหล็ก	ผงหินปูน	
1	C1	1.00	-	-	-	-
2	C1-10BA1	1.00	-	-	-	10%
3	C1-10BA2	1.00	-	-	-	10%
4	C1-10BA3	1.00	-	-	-	10%
5	C1-30BA1	1.00	-	-	-	30%
6	C1-30BA2	1.00	-	-	-	30%
7	C1-30BA3	1.00	-	-	-	30%
8	C1-40FA	0.60	0.40	-	-	-
9	C1-40FA-10BA1	0.60	0.40	-	-	10%
10	C1-40FA-10BA2	0.60	0.40	-	-	10%
11	C1-40FA-10BA3	0.60	0.40	-	-	10%
12	C1-40FA-30BA1	0.60	0.40	-	-	30%
13	C1-40FA-30BA2	0.60	0.40	-	-	30%
14	C1-40FA-30BA3	0.60	0.40	-	-	30%
15	C1-50SL	0.50	-	0.50	-	-
16	C1-50SL-10BA1	0.50	-	0.50	-	10%
17	C1-50SL-10BA2	0.50	-	0.50	-	10%
18	C1-50SL-10BA3	0.50	-	0.50	-	10%
19	C1-50SL-30BA1	0.50	-	0.50	-	30%
20	C1-50SL-30BA2	0.50	-	0.50	-	30%
21	C1-50SL-30BA3	0.50	-	0.50	-	30%
22	C1-10LP	0.90	-	-	0.10	-
23	C1-10LP-10BA1	0.90	-	-	0.10	10%
24	C1-10LP-10BA2	0.90	-	-	0.10	10%
25	C1-10LP-10BA3	0.90	-	-	0.10	10%

ตารางที่ 3.5 (ต่อ)

ที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์พอร์ต แลนด์ประเภทที่ 1	ถั่วลอย	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก บดละเอียด	ผงหินปูน	เถ้าก้นเตา (โดยปริมาตรของ ทราย)
26	C1-10LP-30BA1	0.90	-	-	0.10	30%
27	C1-10LP-30BA2	0.90	-	-	0.10	30%
28	C1-10LP-30BA3	0.90	-	-	0.10	30%

หมายเหตุ

C1	หมายถึง	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
C5	หมายถึง	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5
FA	หมายถึง	ถั่วลอย ชนิดที่ 1 จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ
FB	หมายถึง	ถั่วลอย ชนิดที่ 2 จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ
FC	หมายถึง	ถั่วลอย ชนิดที่ 3 จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ
FD	หมายถึง	ถั่วลอยชนิดที่ 4 จากโรงไฟฟ้า BSCP
SL	หมายถึง	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
SF	หมายถึง	ซิลิกาฟูม
LP	หมายถึง	ผงหินปูนความละเอียด 8 ไมโครเมตร
5LP	หมายถึง	แทนที่ผงหินปูนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทั้งหมด
10LP	หมายถึง	แทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทั้งหมด
20FA	หมายถึง	แทนที่ถั่วลอยทั้ง 4 ชนิด ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทั้งหมด
40FA	หมายถึง	แทนที่ถั่วลอยทั้ง 4 ชนิด ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทั้งหมด
30SL	หมายถึง	แทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุ
50SL	หมายถึง	แทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุ
ประสานทั้งหมด		
5SF	หมายถึง	แทนที่ซิลิกาฟูมร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทั้งหมด
10SF	หมายถึง	แทนที่ซิลิกาฟูมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทั้งหมด
BA1	หมายถึง	เถ้าก้นเตา 1
BA2	หมายถึง	เถ้าก้นเตา 2
BA3	หมายถึง	เถ้าก้นเตา 3
10BA1	หมายถึง	แทนที่เถ้าก้นเตา 1 ร้อยละ 10 โดยปริมาตรของทราย
10BA2	หมายถึง	แทนที่เถ้าก้นเตา 2 ร้อยละ 10 โดยปริมาตรของทราย
10BA3	หมายถึง	แทนที่เถ้าก้นเตา 3 ร้อยละ 10 โดยปริมาตรของทราย
30BA1	หมายถึง	แทนที่เถ้าก้นเตา 1 ร้อยละ 30 โดยปริมาตรของทราย
30BA2	หมายถึง	แทนที่เถ้าก้นเตา 2 ร้อยละ 30 โดยปริมาตรของทราย
30BA3	หมายถึง	แทนที่เถ้าก้นเตา 3 ร้อยละ 30 โดยปริมาตรของทราย

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์

การศึกษาด้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ในครั้งนี้ ได้พิจารณาในการประเมินการต้านทานซัลเฟตไร 2 ลักษณะ คือ การขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์นสารละลายซัลเฟต โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การขยายตัว

การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายซัลเฟตในครั้งนี้จะพิจารณาถึง 1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน 2) ผลกระทบจากชนิดของเถ้าลอย 3) ผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟต และ 4) ผลกระทบจากเมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียด ต่อการขยายตัวในสารละลายซัลเฟต โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการขยายตัวของมอร์ตาร์

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ ได้แก่ ปูนซีเมนต์แลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน แทนที่ในปูนซีเมนต์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยได้พิจารณาทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยมีรายละเอียดดังนี้

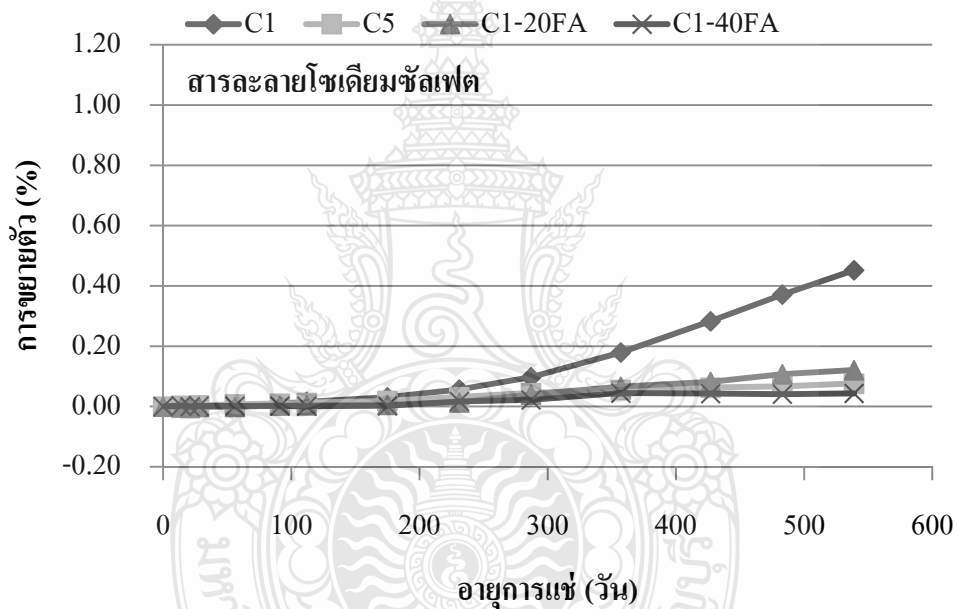
4.1.1.1 กรณีแซในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

1) วัสดุประสานร่วมสองชนิดเมื่อแทนที่เถ้าลอย 4 ชนิดคือ FA, FB, FC และ FD ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก

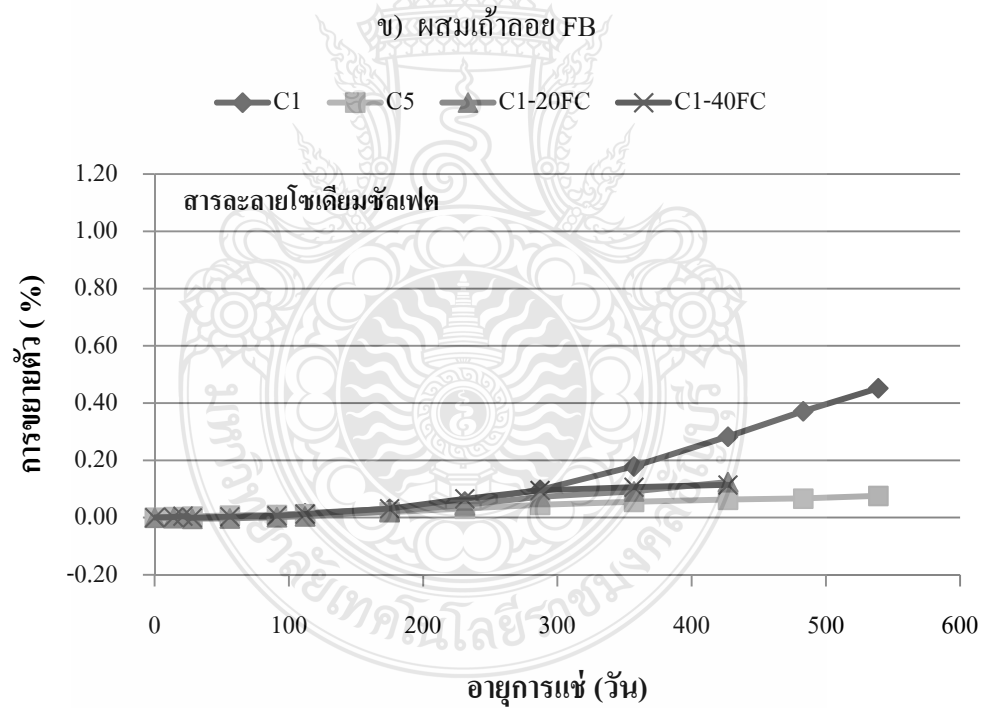
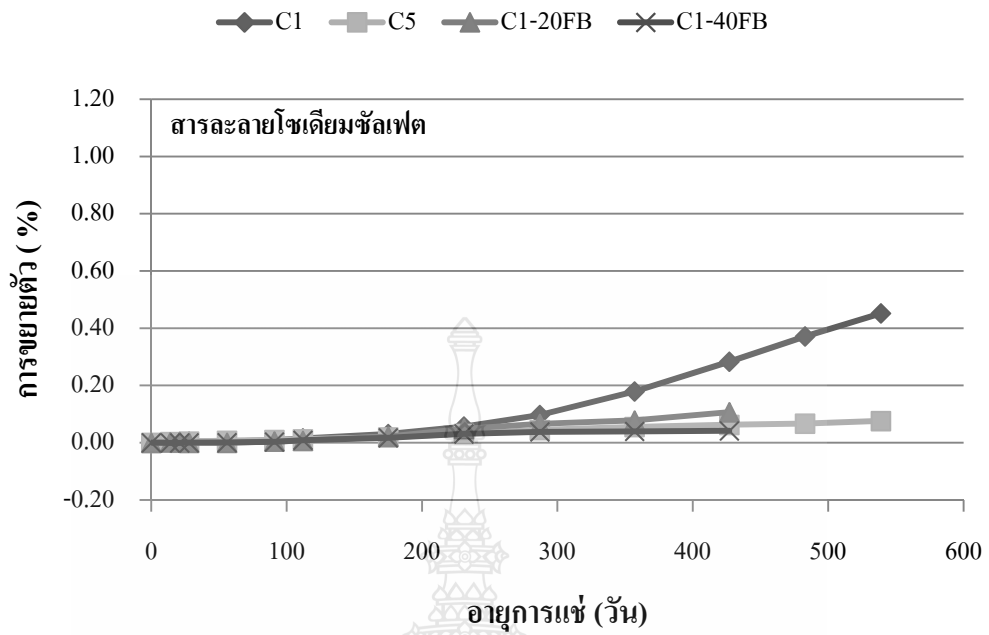
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์กับอายุในการแซในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าการขยายตัวมากกว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้เกิดปริมาณยิปซัม

และ Ettringite น้อยส่งผลทำให้เกิดการขยายตัวในตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วน มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน

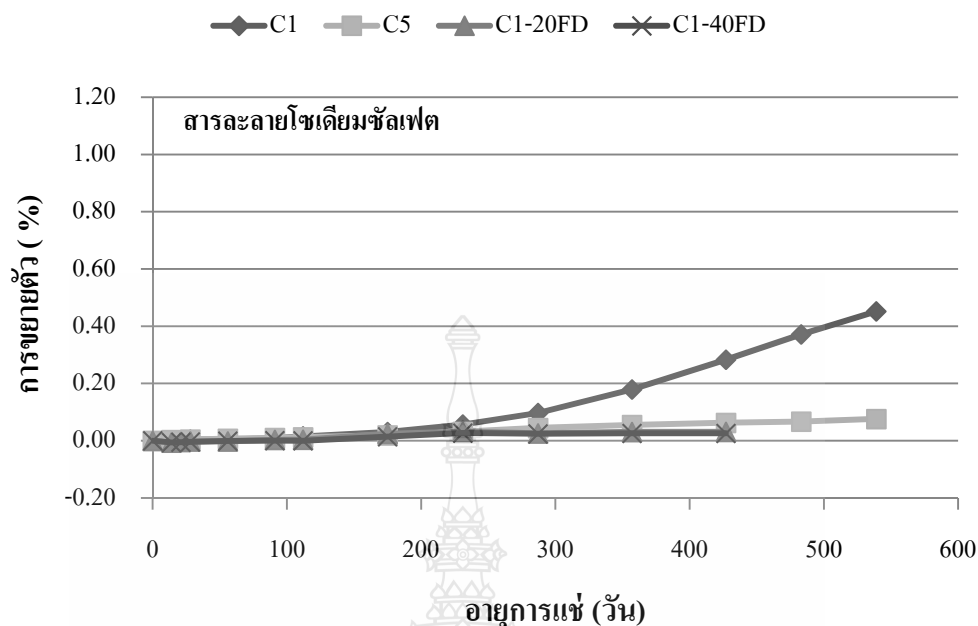
ส่วนตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก รูปที่ 4.1 พบว่า การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย มีค่าการขยายน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน โดยเฉพาะเมื่อแทนในปริมาณที่มาก (ร้อยละ 40) ทั้งนี้เพราะการแทนที่เถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์และผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้สามารถลด Ca(OH)_2 ได้มากจึงทำให้เกิดยิปซัมและ Ettringite น้อยส่งผลให้เกิดค่าของการขยายตัวน้อยลง



ก) ผสมเถ้าลอย FA



ค) ผสมถ้ำล่อย FC



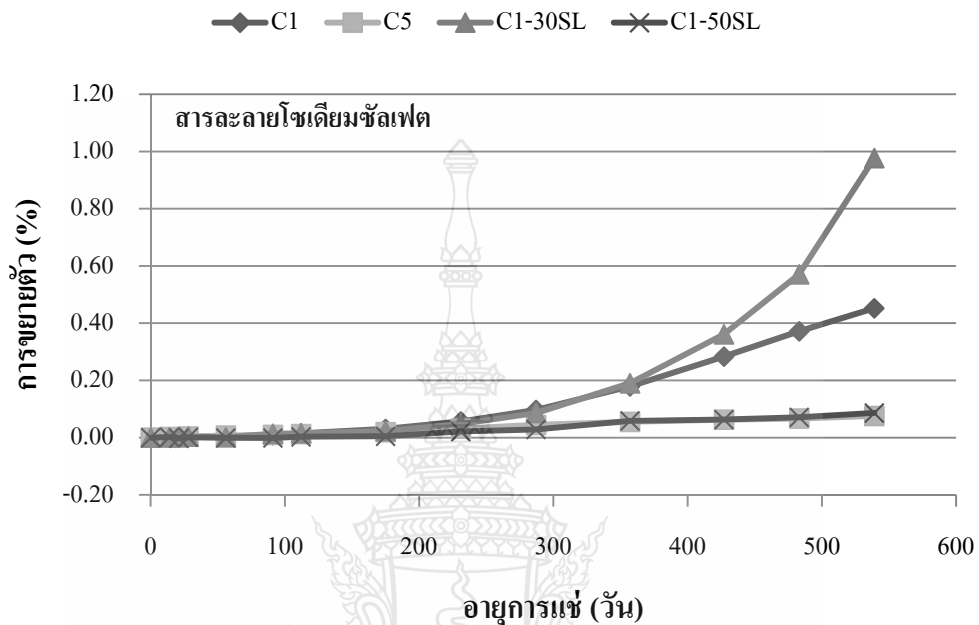
ง) ผสมแก้ลอย FD

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ตาร์ผสมแก้ลอย

2) วัสดุประสานร่วมสองชนิดเมื่อแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์กับอายุในการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่า การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 จะมีแนวโน้มค่าการขยายมากกว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ก่อนข้างสูง (ร้อยละ 36.05) ในปริมาณที่น้อยนั้นปฏิกิริยาปอซโซลาน เกิดน้อยซึ่งทำให้ลดปริมาณ Ca(OH)_2 ได้น้อยทำให้ Ettingite เกิดมาก ในขณะที่ตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 มีค่าการ

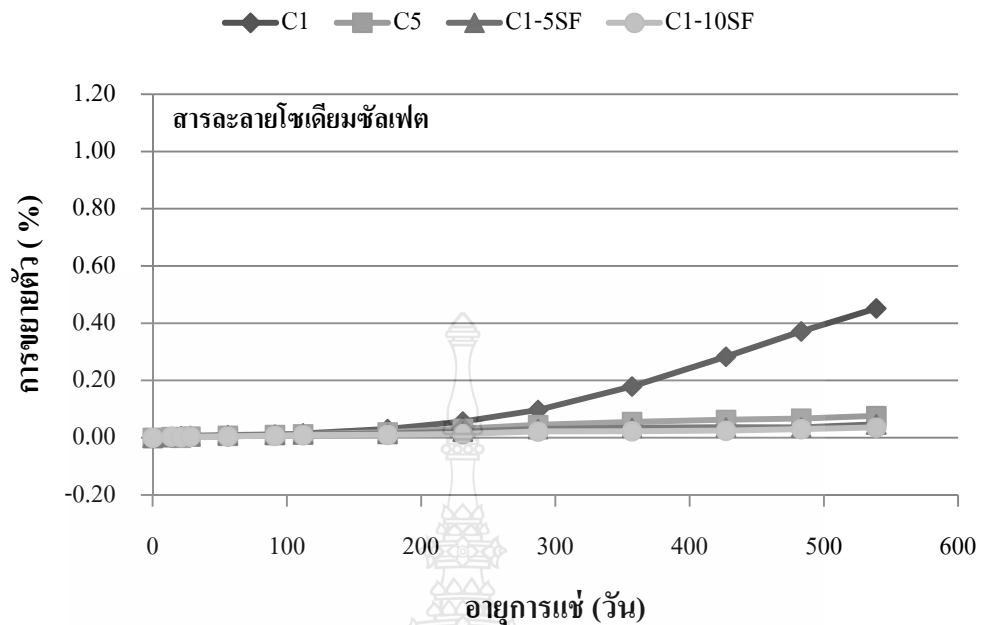
ขยายตัวน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ร้อยละ 50 จะเหลือปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิด Ettingite น้อย



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ต้าร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

3) วัสดุประสานร่วมสองชนิดเมื่อแทนที่ซิลิกาฟูมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์กับอายุในการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยซิลิกาฟูมในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า การขยายตัวของมอร์ต้าร์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ซิลิกาฟูมร้อยละ 5 และ 10 จะมีแนวโน้มค่าการขยายตัวน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยลดปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ รวมทั้งซิลิกาฟูมมีความละเอียดสูง ซึ่งจะเข้าไปช่วยเติมเต็มช่องว่างในมอร์ต้าร์จึงทำให้สารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ยากส่งผลให้ค่าการขยายตัวน้อย

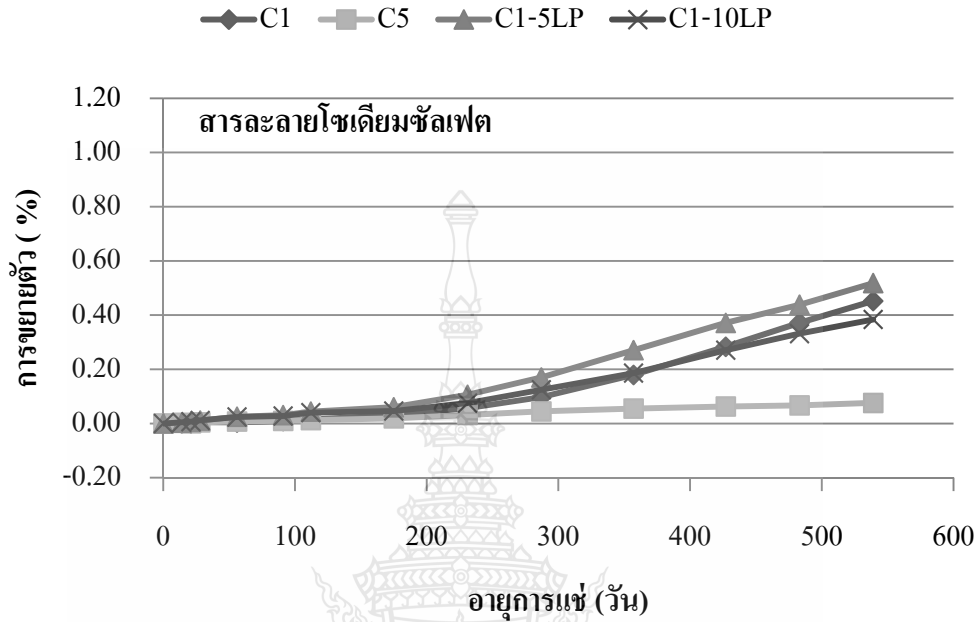


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ่ม

4) วัสดุประสานร่วมสองชนิดเมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์กับอายุในการแช่สารละลายโซเดียมซิลิเฟต ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 จะมีแนวโน้มค่าการขยายตัวมากกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากผงหินปูนไม่มีคุณสมบัติการทำปฏิกิริยาทางเคมีแต่จะมีคุณสมบัติทางกายภาพกล่าวคือ ผงหินปูนจะเข้าไปอุดช่องว่างในมอร์ตาร์ทำให้มอร์ตาร์มีความแน่นเพิ่มขึ้นและทำให้ช่องว่างน้อยลง เมื่อสารละลายโซเดียมซิลิเฟต เข้าไปทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในมอร์ตาร์ทำให้เกิดยิปซัมและ Ettringite ทำให้เกิดการขยายตัว เนื่องจากมอร์ตาร์เหลือช่องว่างให้ขยายตัวน้อยแต่ Ettringite ยังเกิดการขยายตัวต่อไปเรื่อยๆ จนทำให้มอร์ตาร์เกิดการแตกร้าวจึงเป็นผลทำให้ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 มี การขยายตัวมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

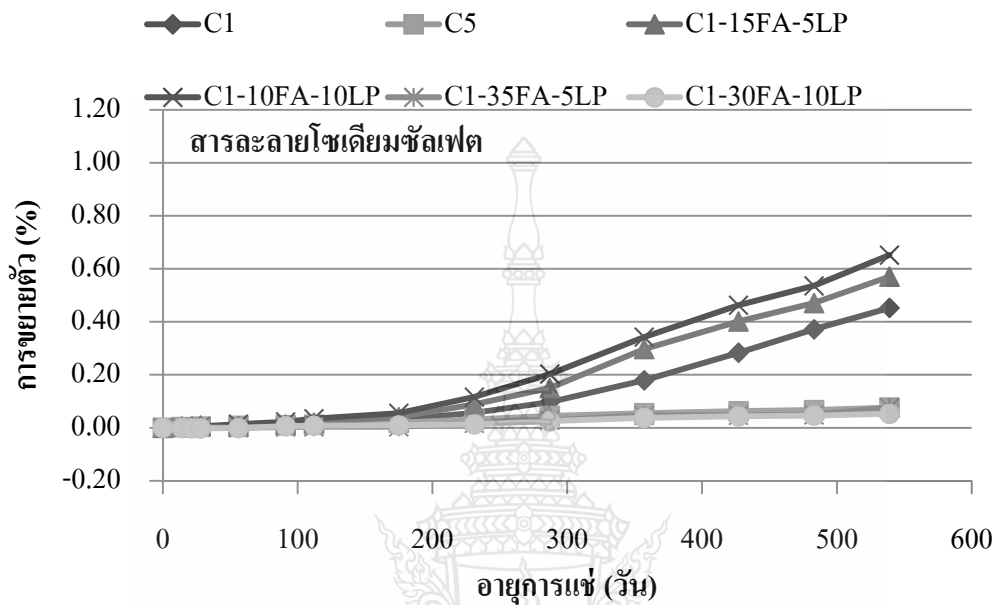


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน

5) วัสดุประสานร่วมสามชนิดเมื่อแทนที่ด้วย FA ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 15, 30 และ 35 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์กับอายุในการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย FA ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 15, 30 และ 35 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วน ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า การขยายตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย FA ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ FA ร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 จะมีค่าการขยายตัวมากกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ด้วย FA ซึ่งมีปริมาณ CaO ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 16.52) ในปริมาณที่ต่ำ ผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยลด Ca(OH)_2 ใต้น้อย จึงทำให้เกิด Ettringite มากขึ้น ส่วนการแทนที่ผง

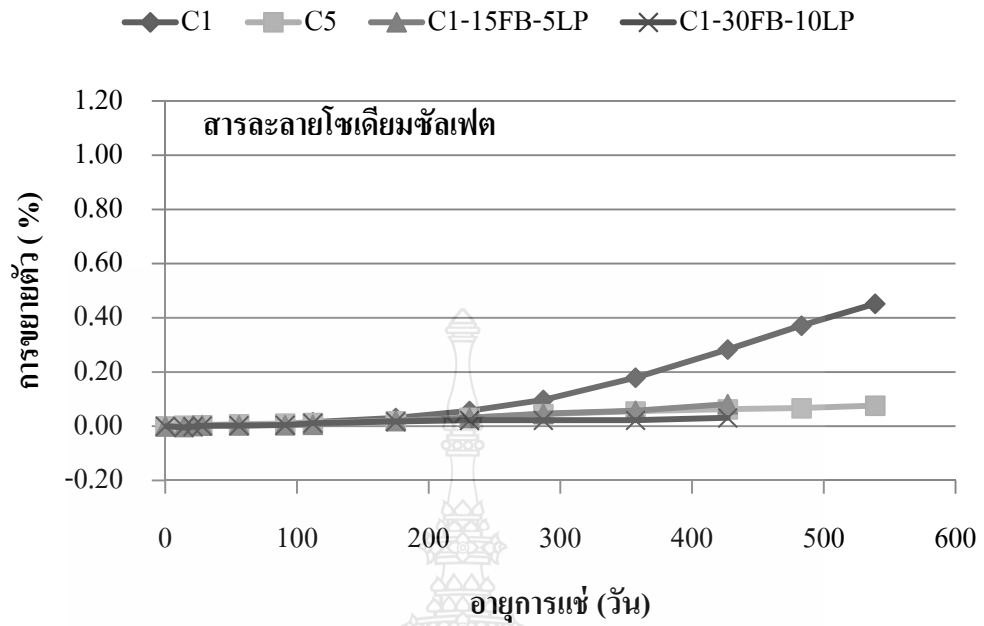
หินปูนจะช่วยในการเติมเต็มช่องว่างทำให้ตัวอย่างมอร์ต้ารมีช่องว่างน้อยลง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในกรณีการแทนที่ด้วยผงหินปูน ส่วนเมื่อแทนที่ด้วยเกลือร่วมในปริมาณที่มาก ส่งผลให้การขยายตัวน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



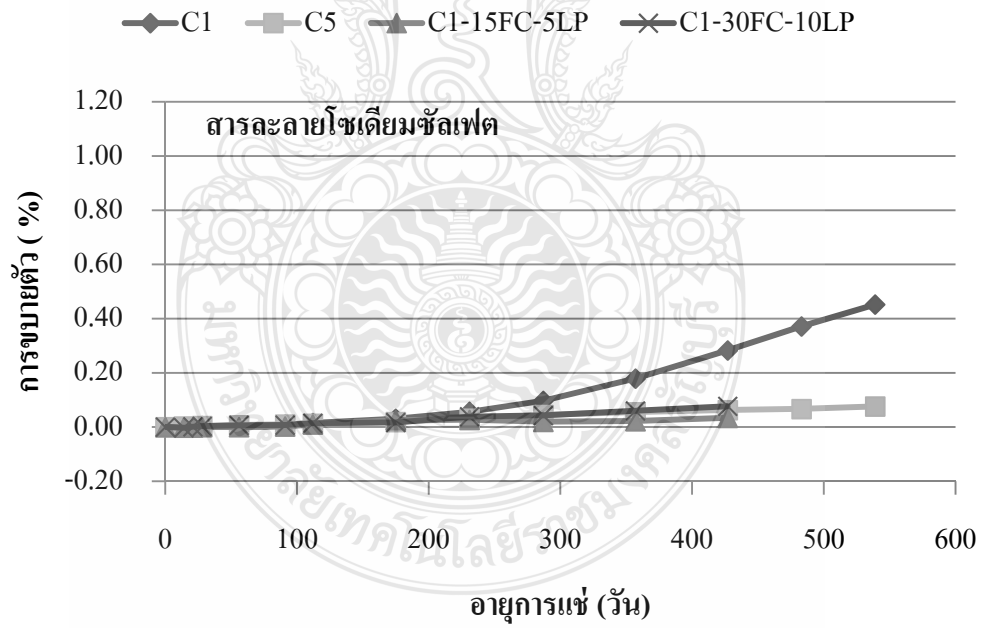
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ต้าร์ผสมเกลือ FA ร่วมกับผงหินปูน

6) วัสดุประสานร่วมสามชนิดเมื่อแทนที่ด้วย เกลือ FB, FC และ FD ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15 และ 30 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

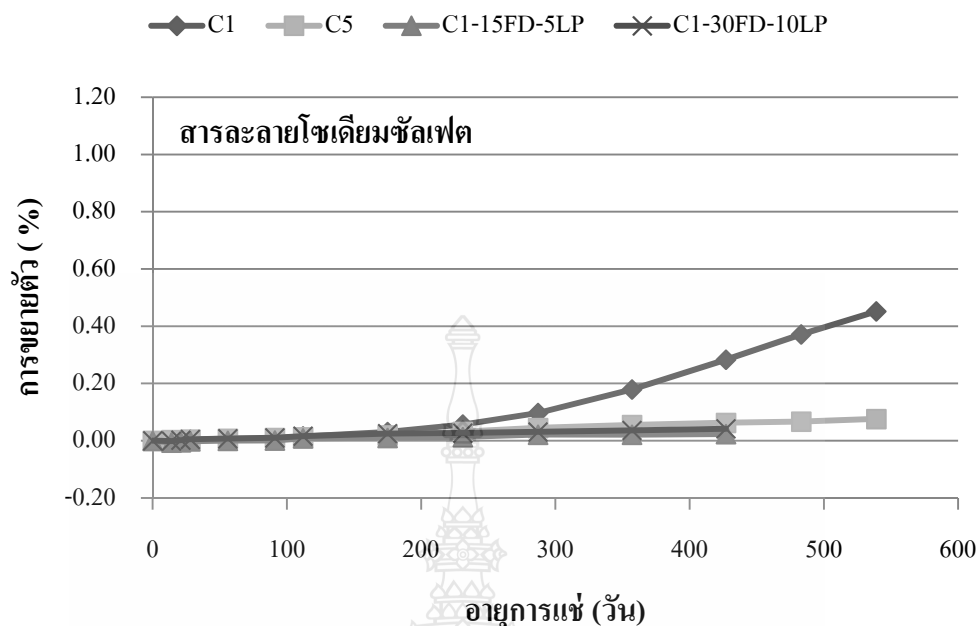
รูปที่ 4.6 ก) ถึง ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์กับอายุในการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเกลือ FB, FC และ FD ในอัตราส่วนร้อยละ 15 และ 30 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า การขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมเกลือร่วมกับผงหินปูนมีค่าการขยายตัวน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทั้งนี้เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้วก็คือ การแทนที่ด้วยเกลือจะช่วยลดปริมาณ Ca(OH)_2 และการใช้ผงหินปูนจะช่วยเติมเต็มช่องว่างให้มอร์ต้าร์เพิ่มความทึบให้กับมอร์ต้าร์



ก) ผสมเส้นใย FB ร่วมกับผงหินปูน



ข) ผสมเส้นใย FC ร่วมกับผงหินปูน



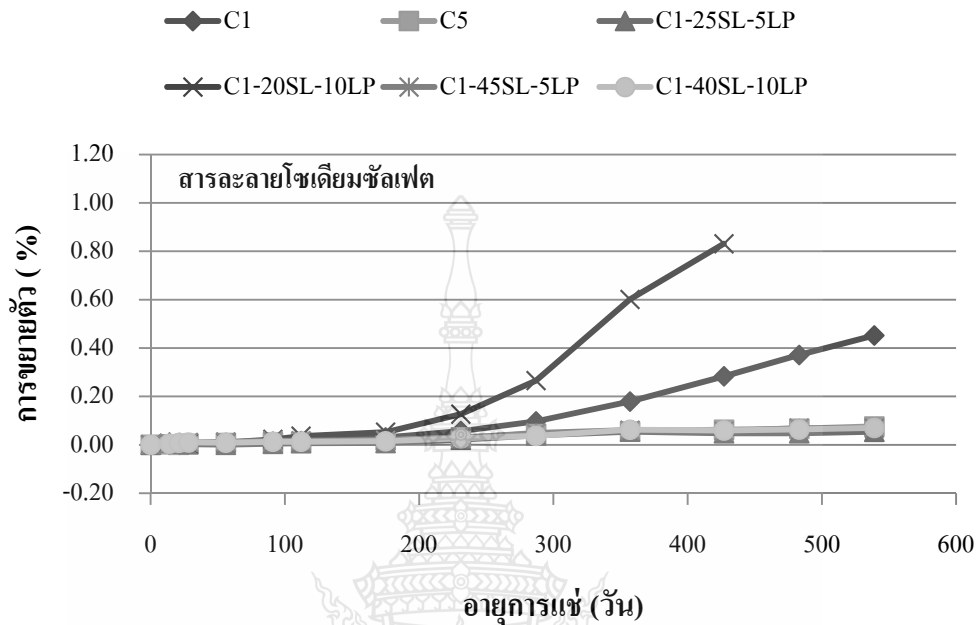
ค) ผสมเถ้าลอย FD ร่วมกับผงหินปูน

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย FB, FC และ FD ร่วมกับผงหินปูน

7) วัตถุประสงค์ร่วมสามชนิดเมื่อแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 25, 40, 45 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์กับอายุในการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20, 25, 40, 45 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า การขยายตัวของมอร์ตาร์ ผสมที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 จะมีค่าการขยายตัวมากกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนซึ่งเป็นการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่น้อย (ร้อยละ 20) โดยมีปริมาณ CaO ของตะกรันเตาถลุงเหล็กค่อนข้างสูง ส่งผลให้การขยายตัวมีค่า

ค่อนข้างมากกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ส่วนการแทนที่ตะกรันเตาถลุง เหล็กบดละเอียดในปริมาณที่มากทำให้ค่าการขยายตัวน้อยลง เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

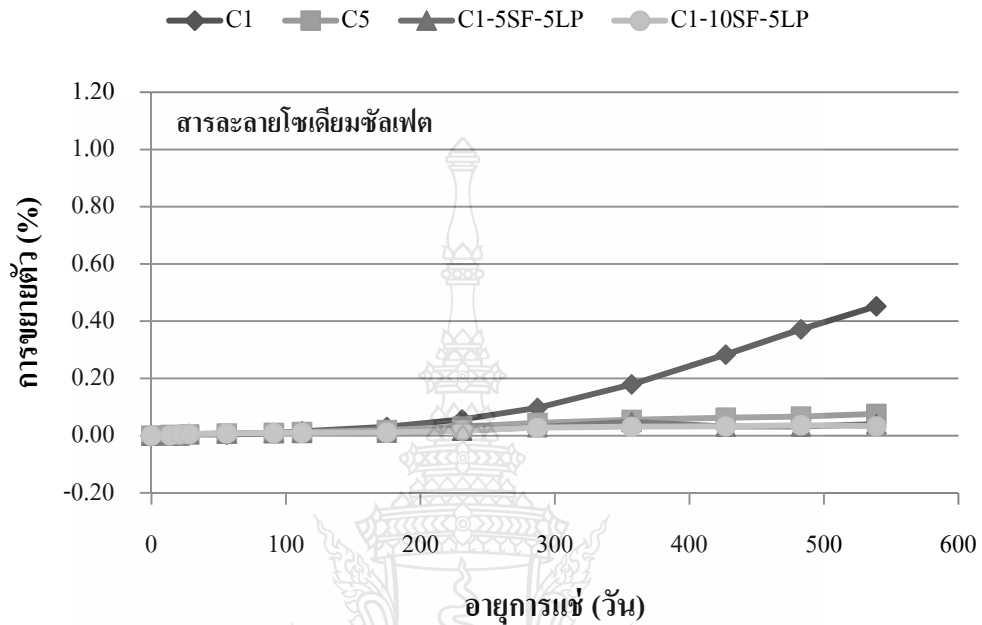


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน

8) วัสดุประสานร่วมสามชนิดเมื่อแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์กับอายุในการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วน และ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ผสมซิลิกาฟุ่มในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า การขยายตัวของมอร์ตาร์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก มีค่าการขยายตัวน้อยกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เนื่องด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้วในกรณีของการแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่ม ส่วนการแทนที่ผงหินปูนจะช่วยในการเติมเต็ม

ช่องว่างทำให้ตัวอย่างมอร์ต้าร์มีความแน่นเพิ่มขึ้นและทำให้ช่องว่างน้อยลง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในกรณีของการแทนที่ด้วยผงหินปูน



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ต้าร์ผสมซิลิกาฟูมร่วมกับผงหินปูน

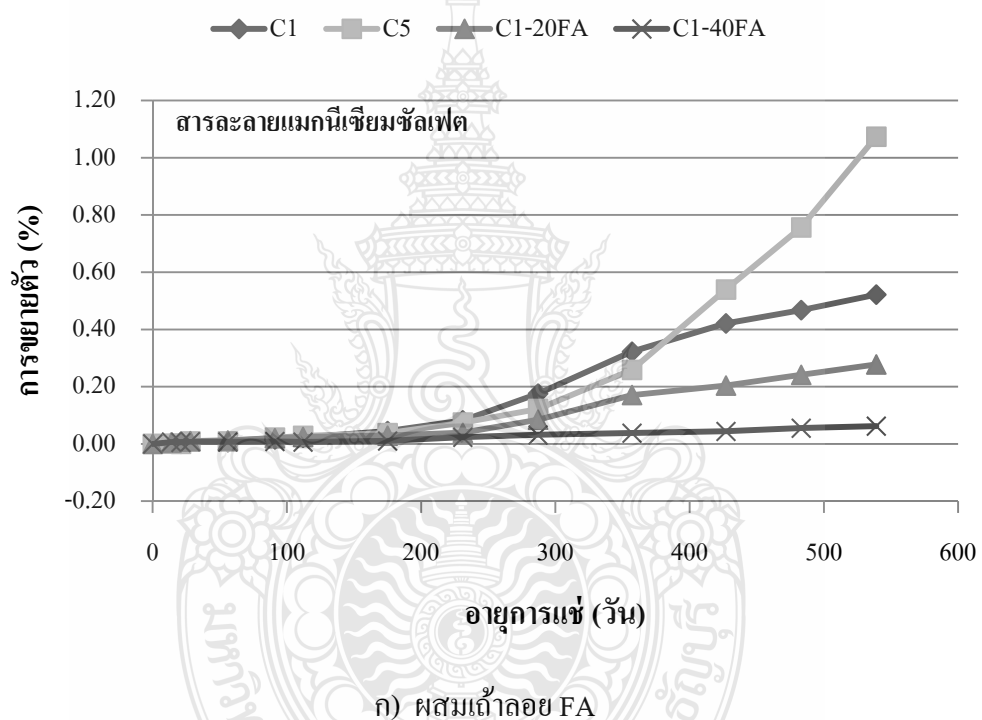
4.1.1.2 กรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

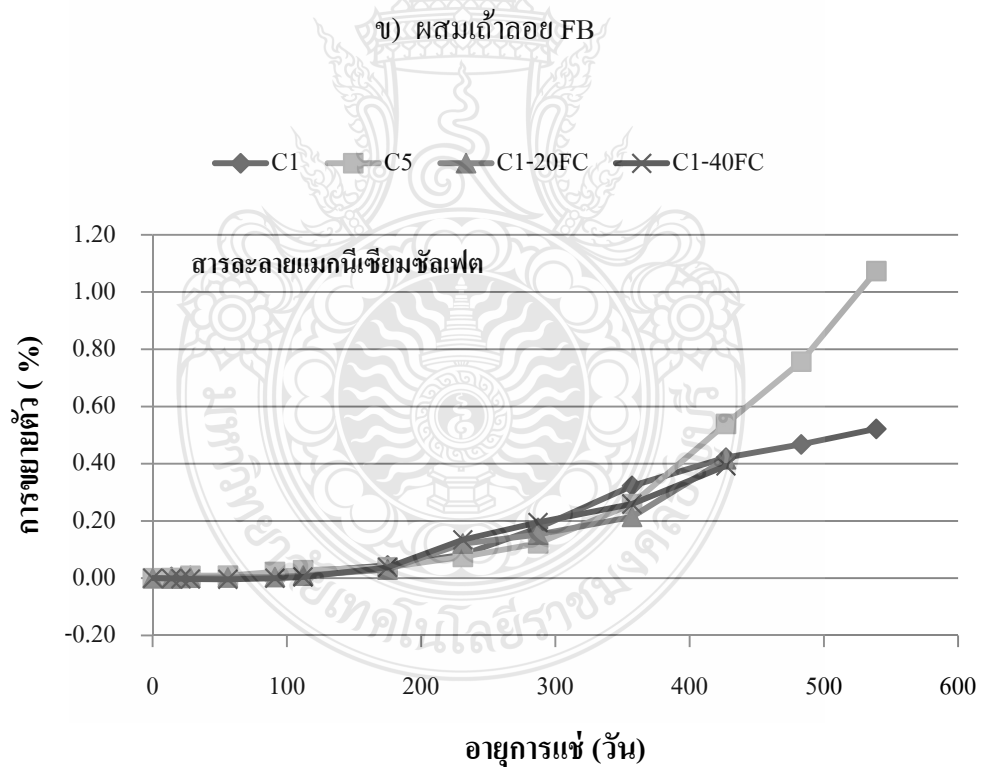
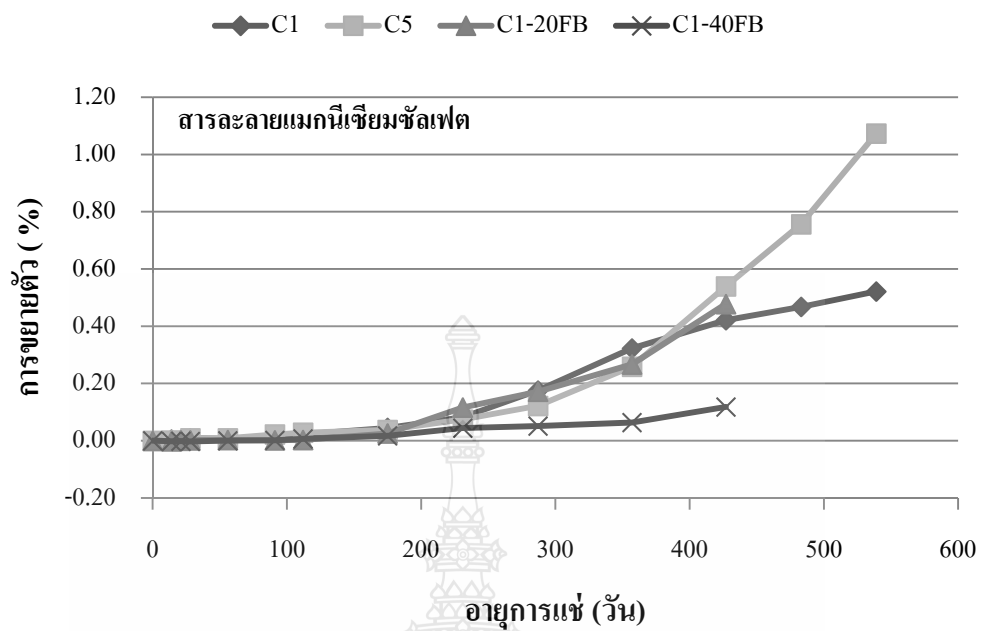
1) วัสดุประสานร่วมสองชนิดเมื่อแทนที่เถ้าลอย FA, FB, FC และ FD ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์กับอายุในการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน พบว่า การขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าการขยายตัวมากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วนมีความพรุนมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่งผลให้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าไปทำลายได้มากกว่า ส่วนเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดส่งผลให้การขยายตัวมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ต

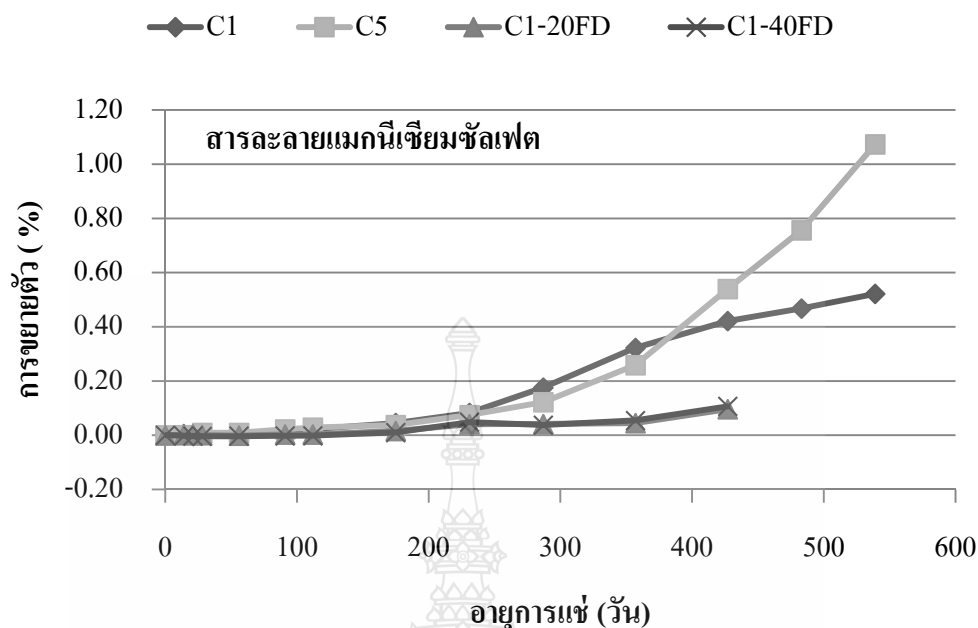
แลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่เถ้าลอยเป็นการลดปูนซีเมนต์และผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้สามารถลด Ca(OH)_2 ได้มาก จึงทำให้เกิดยิปซัมและ Ettringite น้อยส่งผลให้เกิดค่าของการขยายตัวน้อยลง

ส่วนรูปที่ 4.9 ข) ถึง ง) แสดงตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย FB, FC และ FD ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มการขยายตัวน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว





ค) ผสมถั่วลย FC

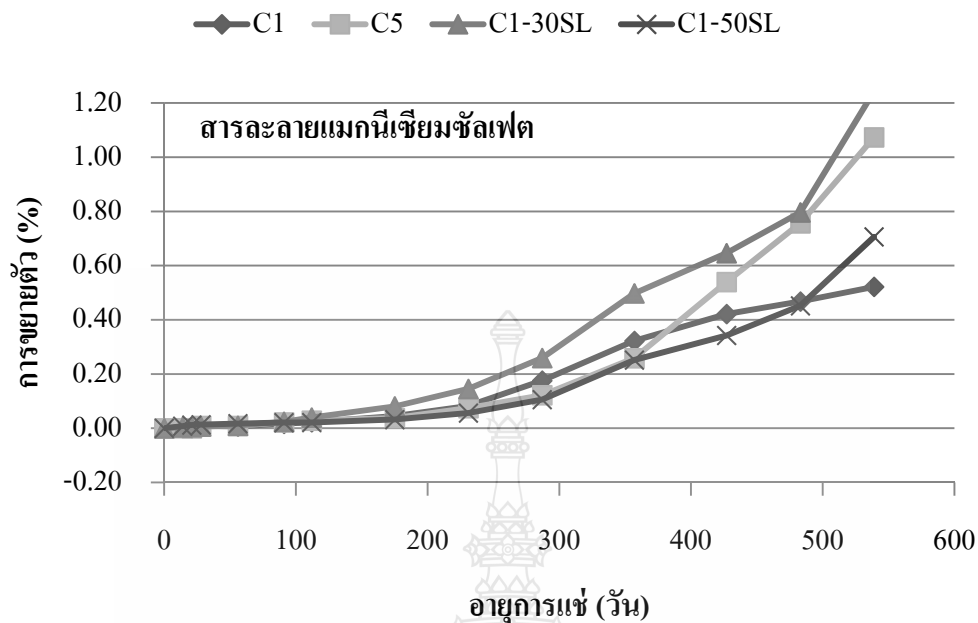


ง) ผสมแก้ลอย FD

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ต้าร์ผสมแก้ลอย

2) วัสดุประสานร่วมสองชนิดเมื่อแทนที่ตะกรันเตากลวงเหล็กบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก

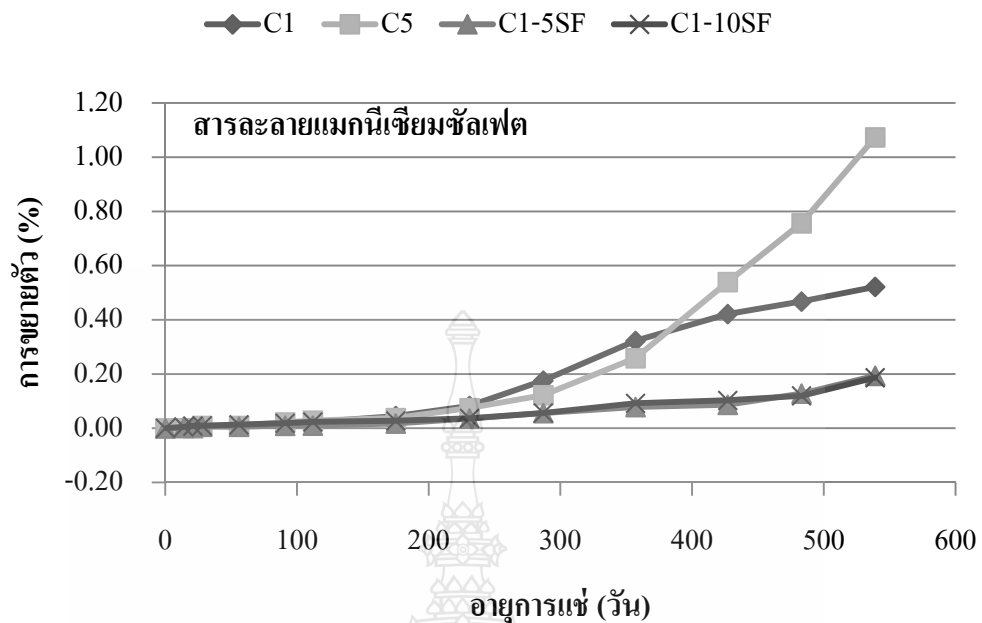
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์กับอายุในการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตากลวงเหล็กบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่า การขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมตะกรันเตากลวงเหล็กบดละเอียด มีค่าการขยายตัวมากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่น้อย จะมีค่าการขยายตัวค่อนข้างมากทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าตะกรันเตากลวงเหล็กบดละเอียดเป็นสารโซลานและสารซีเมนต์ส่งผลทำให้สามารถลดปริมาณ Ca(OH)_2 ได้มากจึงทำให้ไม่มีเสถียรภาพเกิดการหลุดร่อนทำให้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ง่าย



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่วนและมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียด

3) วัสดุประสานร่วมสองชนิดเมื่อแทนที่ซิลิกาฟูมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

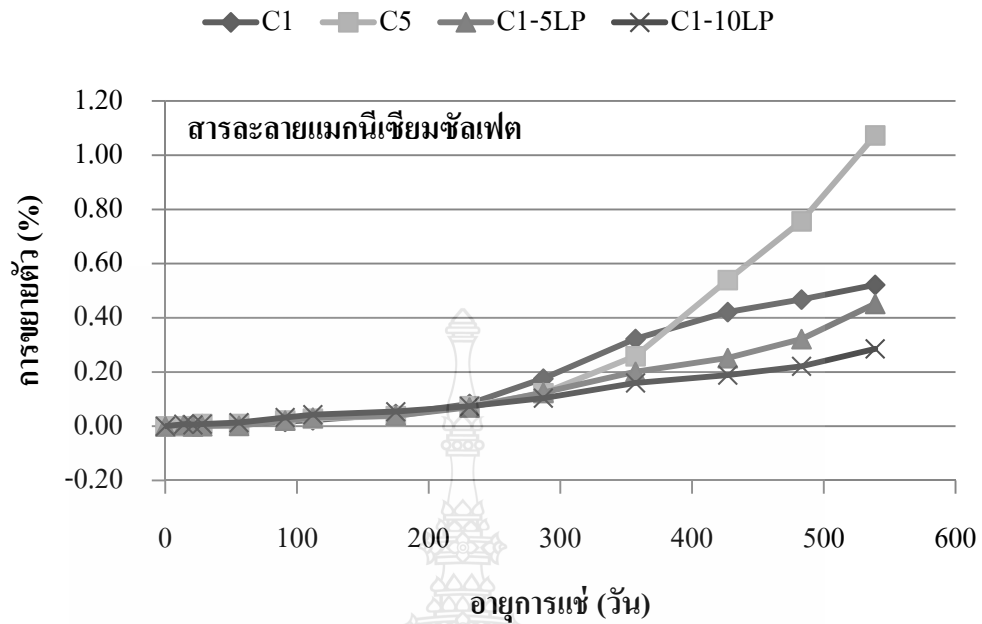
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ กับอายุในการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ส่วน มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วน และมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูมใน อัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า การขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5 และ 10 จะมีแนวโน้มค่าการขยายตัวน้อยกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เนื่อง ด้วยอาจเป็นเพราะซิลิกาฟูมมีอนุภาคค่อนข้างละเอียด ซึ่งจะเข้าไปช่วยเติมเต็มช่องว่างในมอร์ตาร์ทำให้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เข้าไปทำลายได้ยากรวมทั้งสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีทำให้สามารถลดปริมาณ Ca(OH)_2 ส่งผลให้มีค่าการขยายตัวน้อย



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ต้าร์ผสมซิลิกาฟุ่ม

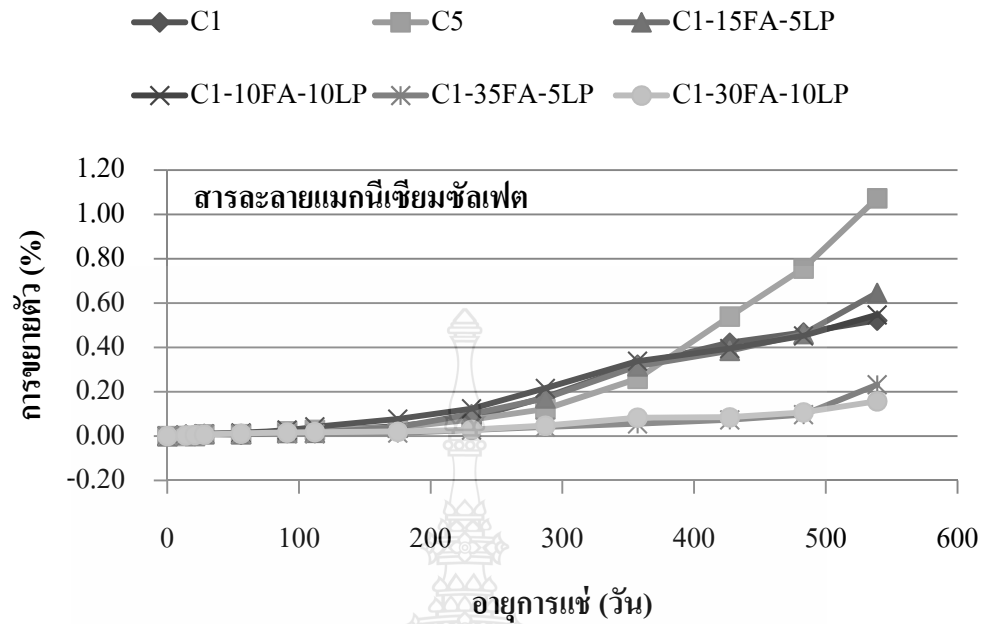
4) วัสดุประสานร่วมสองชนิดเมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์กับอายุในการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า การขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมปูนร้อยละ 5 และ 10 มีแนวโน้มค่าการขยายตัวน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากผงหินปูนไม่มีคุณสมบัติการทำปฏิกิริยาทางเคมีแต่จะมีคุณสมบัติทางกายภาพกล่าวคือ ผงหินปูนจะเข้าไปอุดช่องว่างในมอร์ต้าร์ทำให้มอร์ต้าร์มีช่องว่างน้อยลงและทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้มากขึ้น

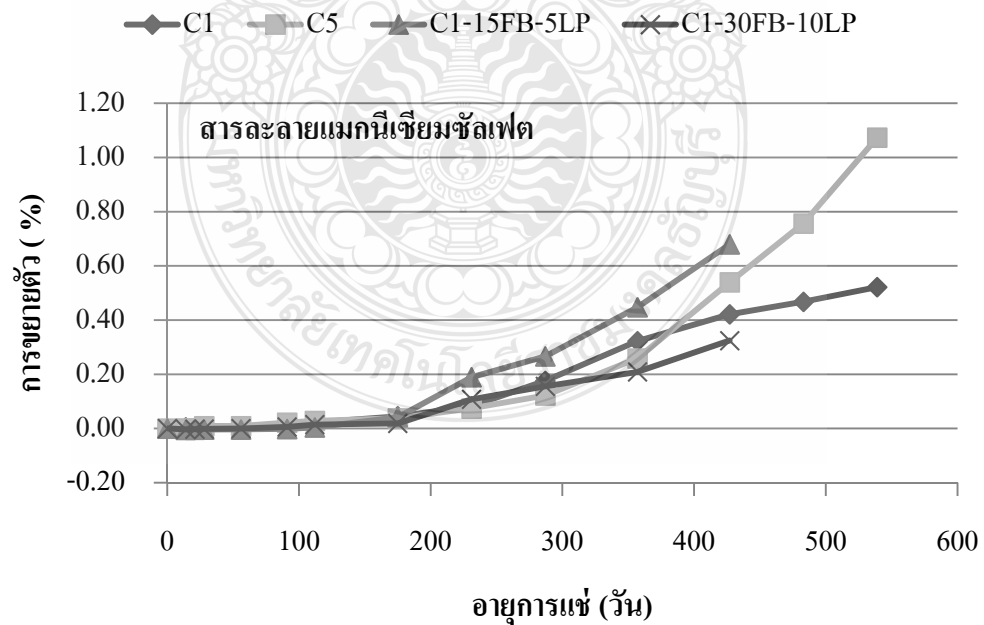


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูน

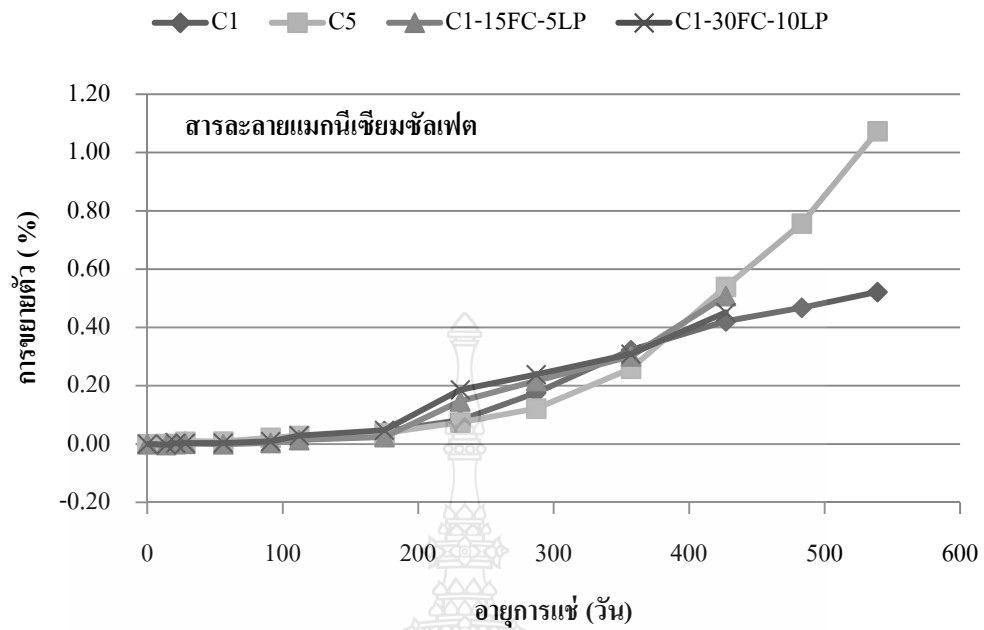
5) วัสดุประสานร่วมสามชนิดเมื่อแทนที่เถ้าลอย (ทั้ง 4 ชนิด), ตะกรันเตา ถลุงดเหล็กบดละเอียดและซิลิกาฟูมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 15, 30, 35 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.16 พบว่า ค่าการขยายตัวไปในการทำงานเดียวกับการแทนที่วัสดุประสาน 2 ชนิด



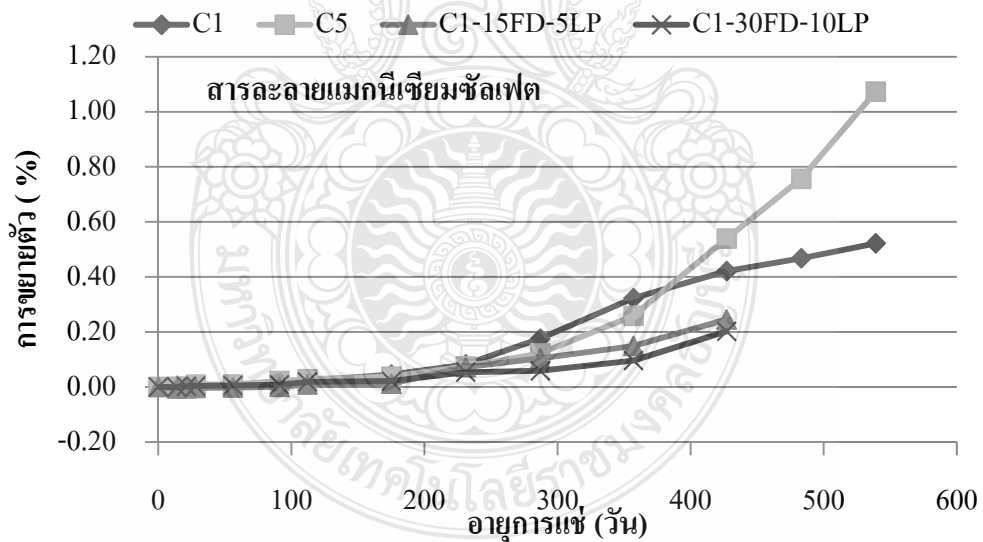
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ต้าร์ผสมด้วยเถ้าลอย FA ร่วมกับผงหินปูน



ก) ผสมเถ้าลอย FB ร่วมกับผงหินปูน

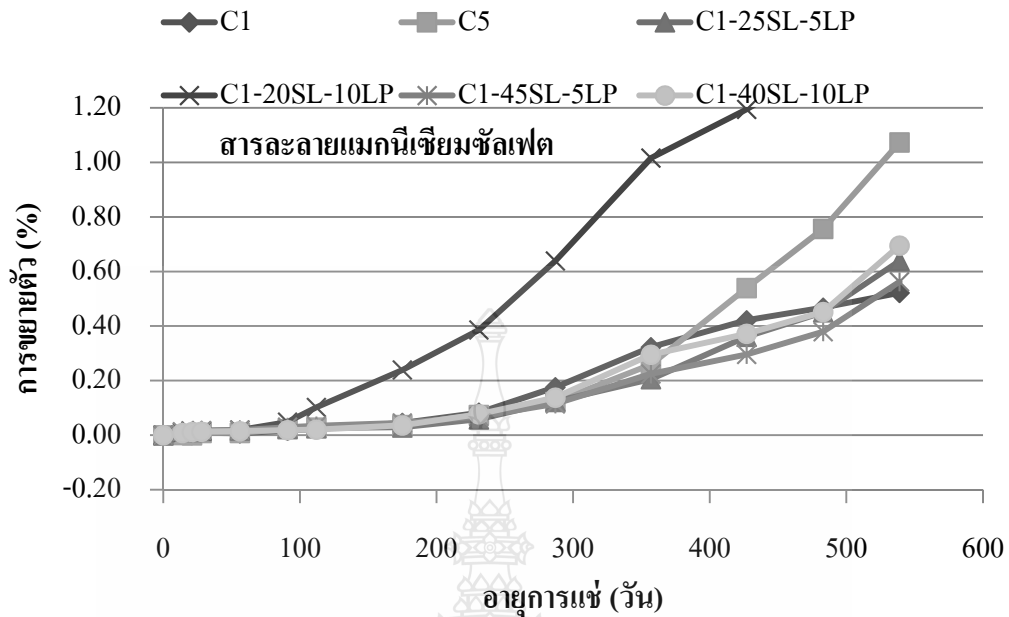


ข) ผสมเถ้าลอย FC ร่วมกับผงหินปูน

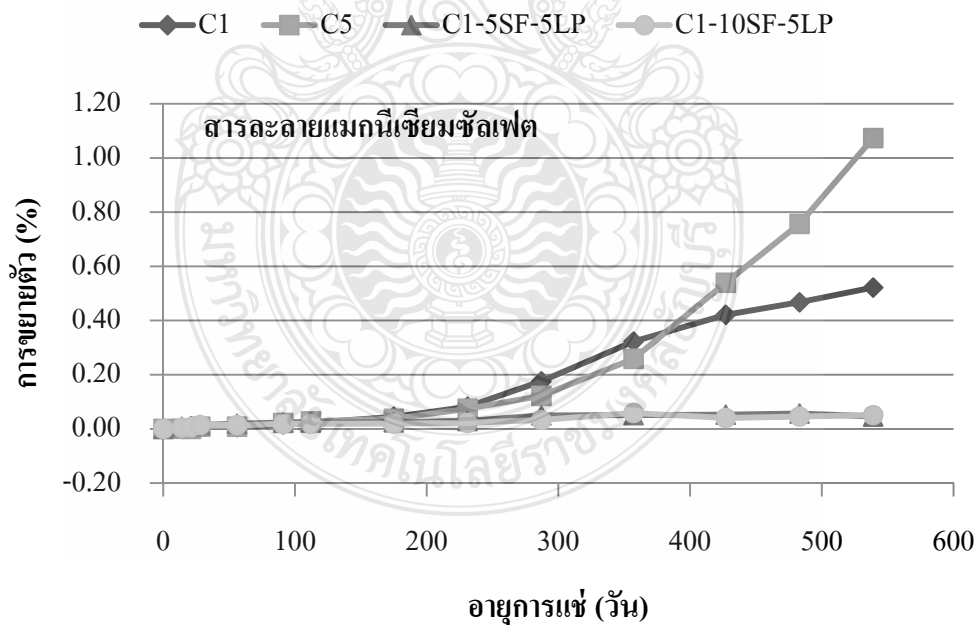


ค) ผสมเถ้าลอย FD ร่วมกับผงหินปูน

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย FB, FC และ FD ร่วมกับผงหินปูน



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซิลิเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ต้าร์ผสมตะกอนเตาถลุงเหล็ก บดละเอียดร่วมกับผงหินปูน



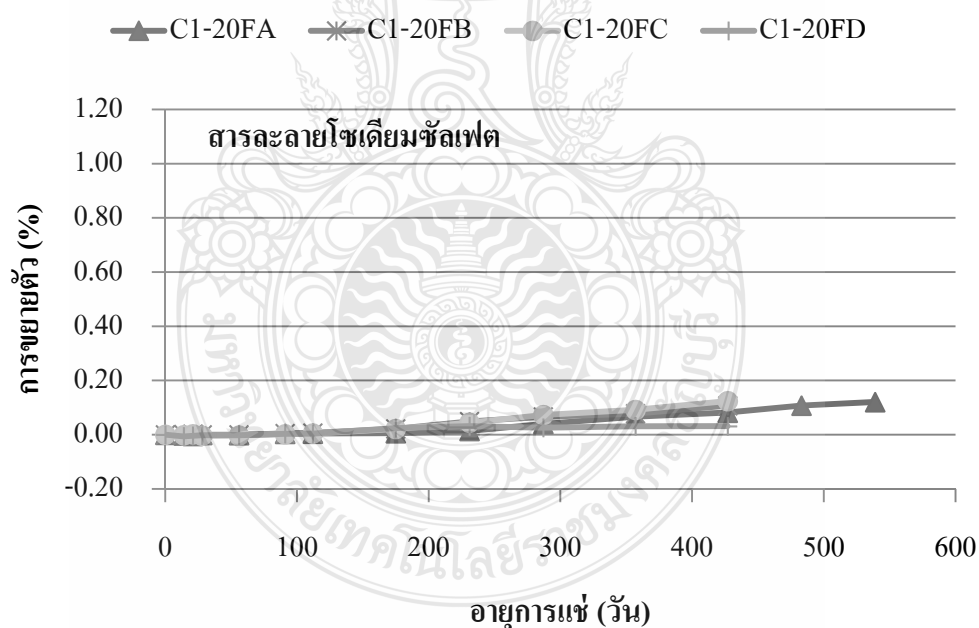
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซิลิเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนและมอร์ต้าร์ผสมซิลิกาฟุ้งร่วมกับ ผงหินปูน

4.1.2 ผลกระทบจากชนิดของเถ้าลอยต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์

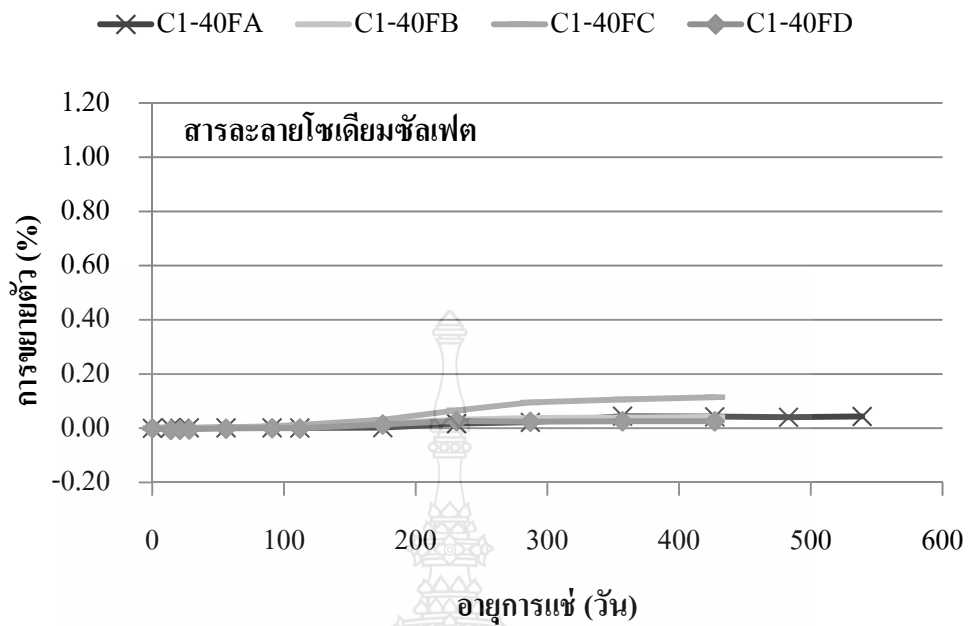
สำหรับเถ้าลอยในการศึกษาผลกระทบจากของชนิดของเถ้าลอยต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในส่วนผสมทั้งหมด จำนวน 4 ชนิดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนที่ต่างกันที่ร้อยละ 20 และ 40 โดยได้พิจารณาทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1.2.1 กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์กับอายุในการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย FA, FB, FC และ FD ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 พบว่ามอร์ต้าร์มีค่าการขยายตัวที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอายุในการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตยังน้อยจึงยังไม่เห็นความแตกต่างของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด จึงยังไม่เห็นผลกระทบของชนิดของเถ้าลอยต่อการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



ก) ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20

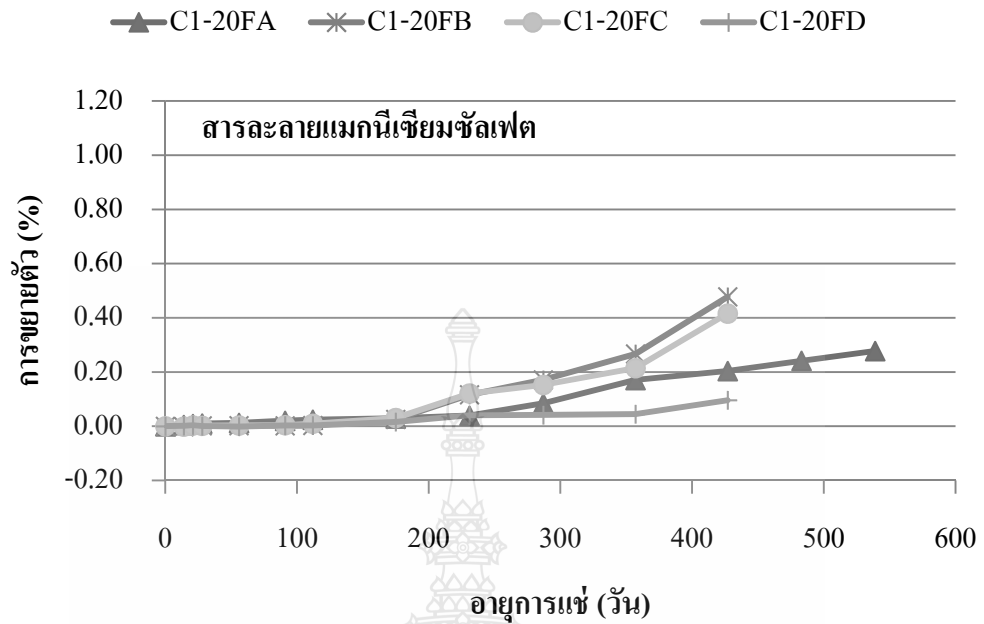


ข) ผสมถ้ำลอยร้อยละ 40

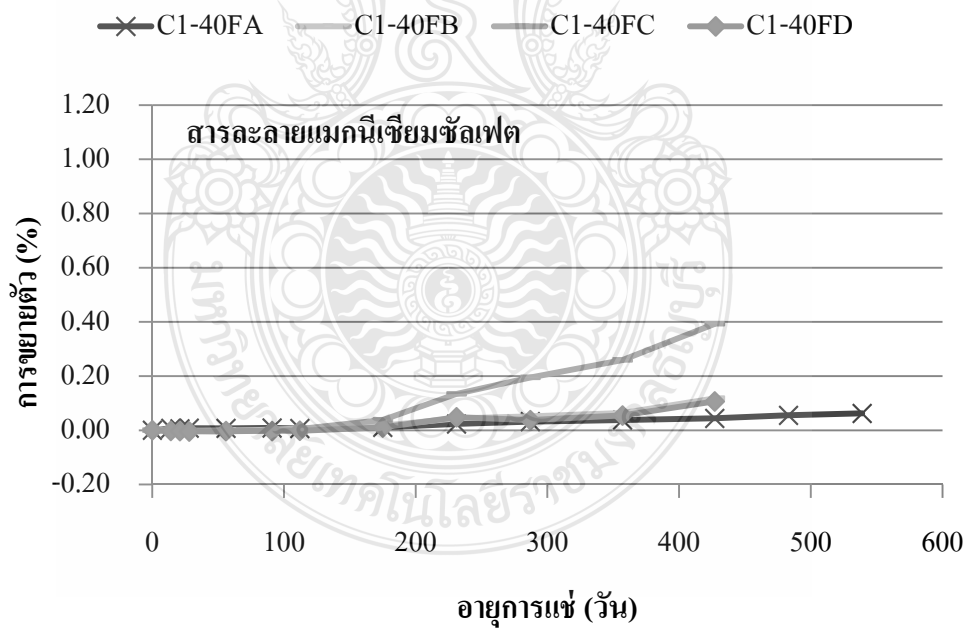
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมถ้ำลอย

4.1.2.2 กรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์กับอายุในการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยถ้ำลอย FA, FB, FC และ FD ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 ซึ่งพบว่า การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมถ้ำลอยทั้ง 4 ชนิด ยังมีค่าการขยายตัวไม่เป็นในทิศทางเดียวกันทั้งนี้อาจเป็นเพราะอายุการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตยังมีน้อยจึงทำให้ค่าการขยายตัวยังไม่ชัดเจนรวมทั้งกลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นการทำให้ไม่มีเสถียรภาพในเฟลต์จึงมีผลให้การขยายตัวค่อนข้างไม่แน่นอน



ก) ผสมเกล็ดลอรีออยละ 20



ข) ผสมเกล็ดลอรีออยละ 40

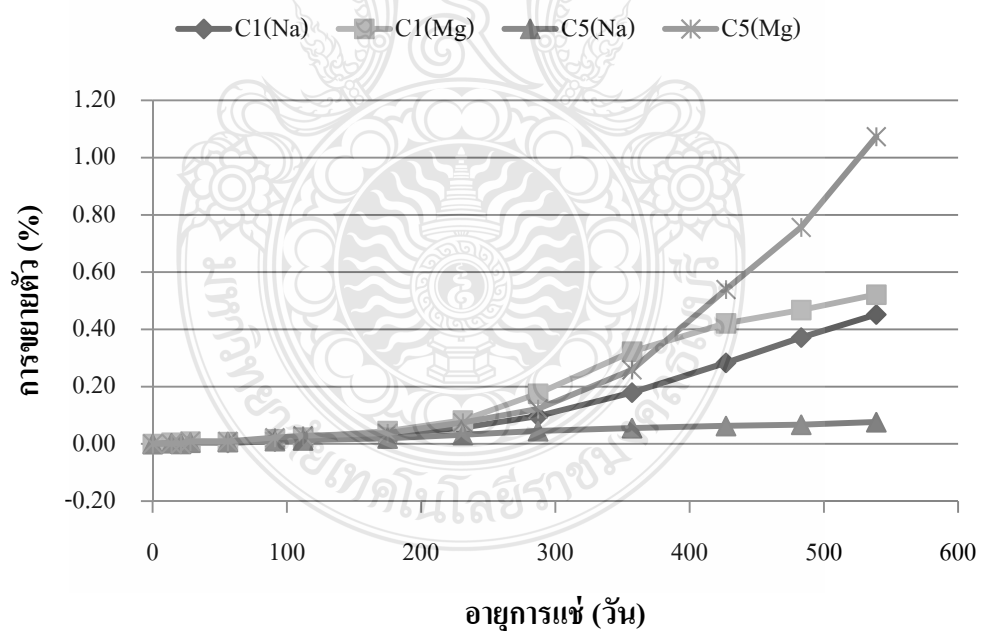
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเกล็ดลอรี

4.1.3 ผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของมอร์ตาร์

สารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้สารละลายซัลเฟต 2 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งมีกลไกในการทำลายที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการประเมินความต้านทานของซัลเฟต โดยการวัดค่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์นั้น จึงได้พิจารณาถึงผลกระทบของชนิดของสารละลายซัลเฟตทั้ง 2 กรณี ที่มีต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายซัลเฟตโดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1.3.1 เมื่อวัสดุประสานเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

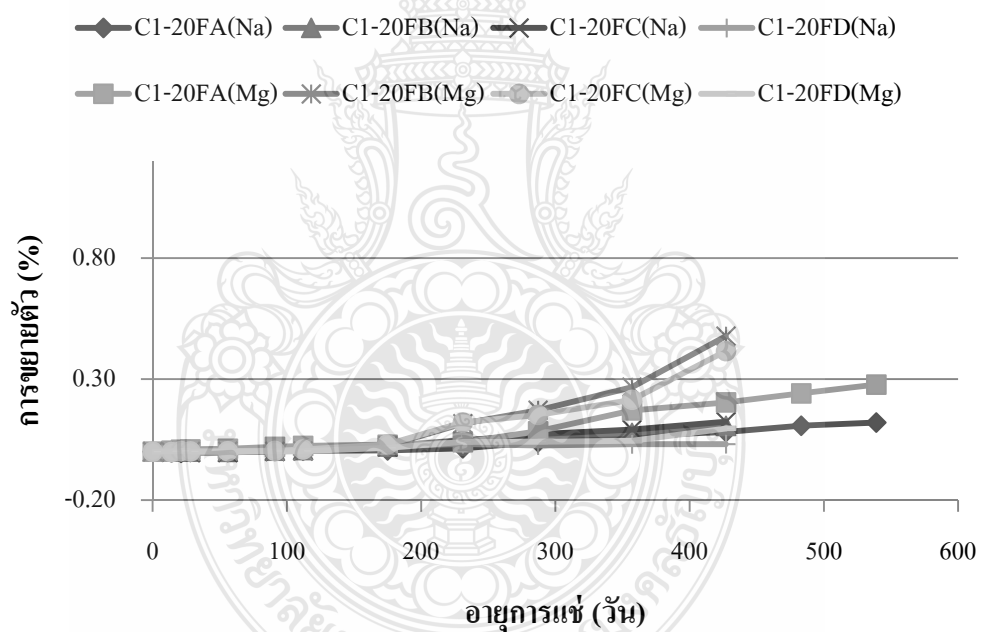
รูปที่ 4.19 แสดงผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน พบว่า ค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าการขยายตัวมากกว่า สารละลายโซเดียมซัลเฟต เนื่องจากในช่วงแรกกลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต จะเกิดขึ้นเร็วกว่าการทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟตจึงทำให้การขยายตัวมีมากกว่า



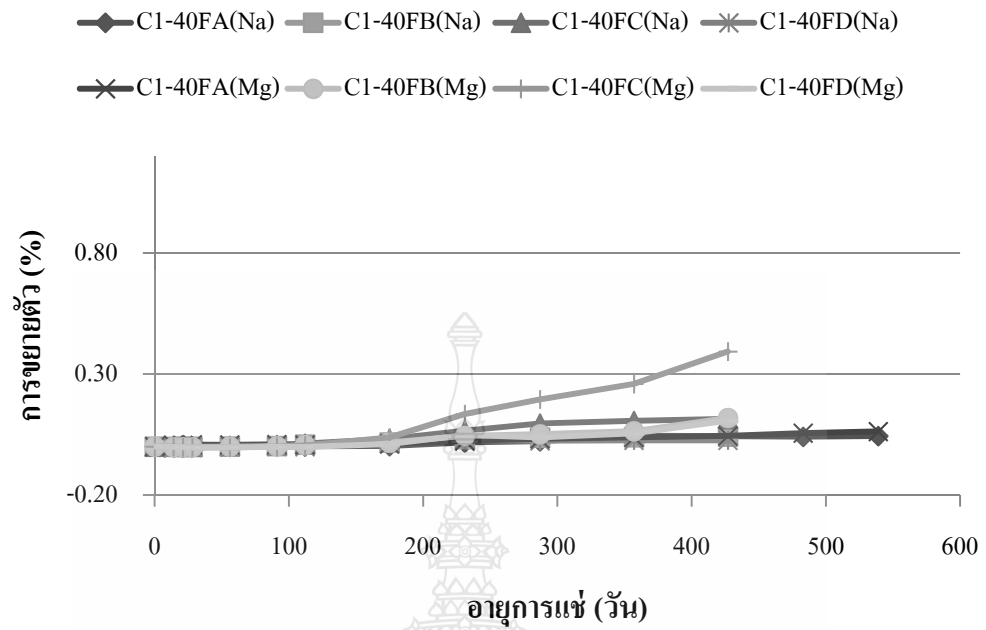
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

ส่วนเมื่อแทนที่ด้วยเกลือ FA, FB, FC และ FD ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก และ แทนที่ด้วยเกลือ FA, FB, FC และ FD ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15 และ 30 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

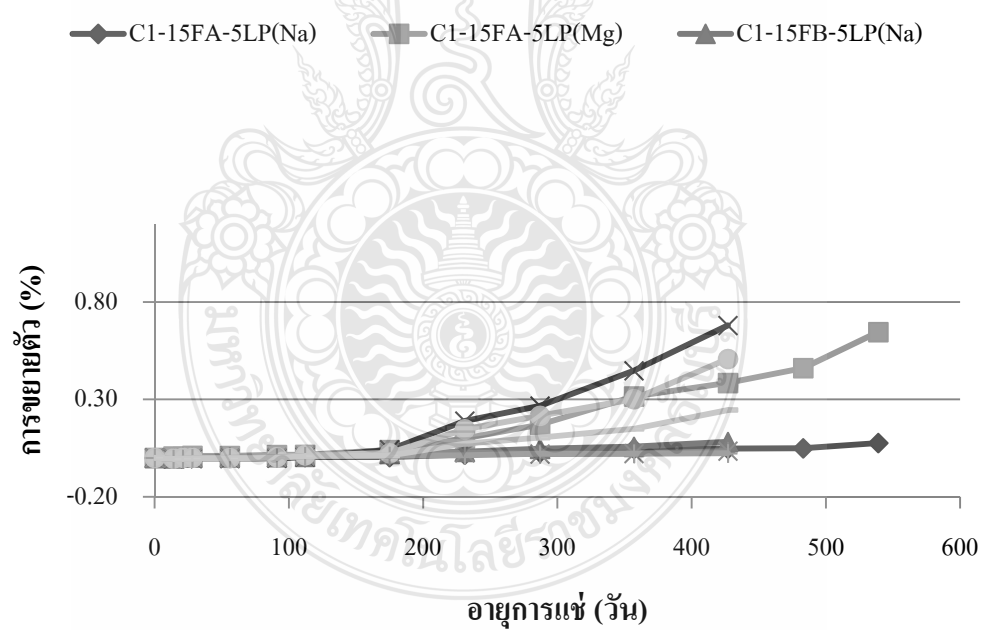
โดยแสดงดังรูปที่ 4.20 ได้แสดงผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเกลือ FA, FB, FC และ FD ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 และ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเกลือ FA, FB, FC และ FD ในอัตราส่วนร้อยละ 15 และ 30 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 พบว่าค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ ในสารละลายสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตให้ค่าการขยายเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอายุของการแช่สารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ยังน้อยจึงอาจยังไม่เห็นความแตกต่างระหว่างในสารละลายซัลเฟตทั้งสอง



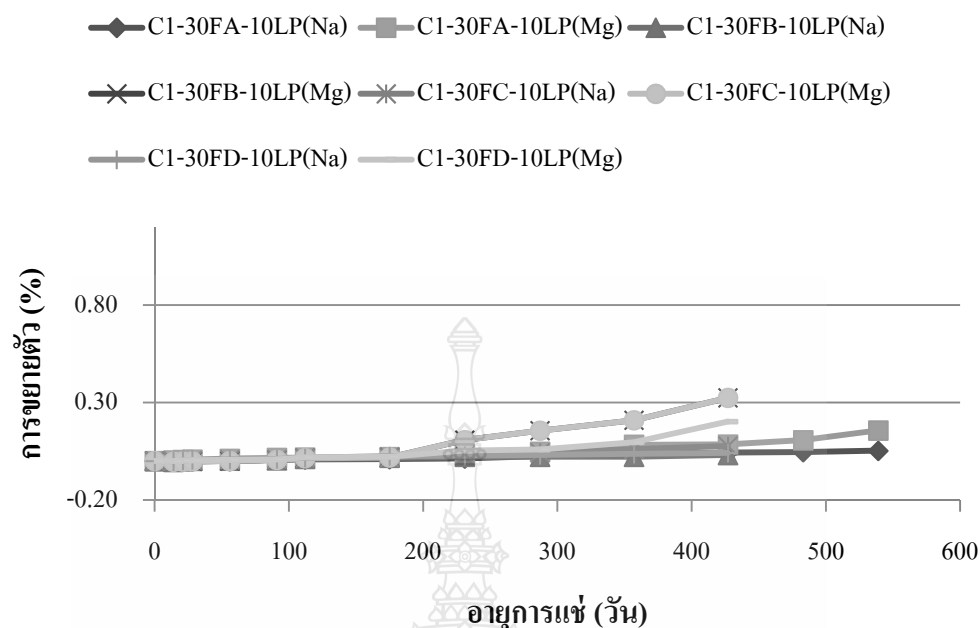
ก) ผสมเกลือ ร้อยละ 20



ข) ผสมถั่วลย ร้อยละ 40



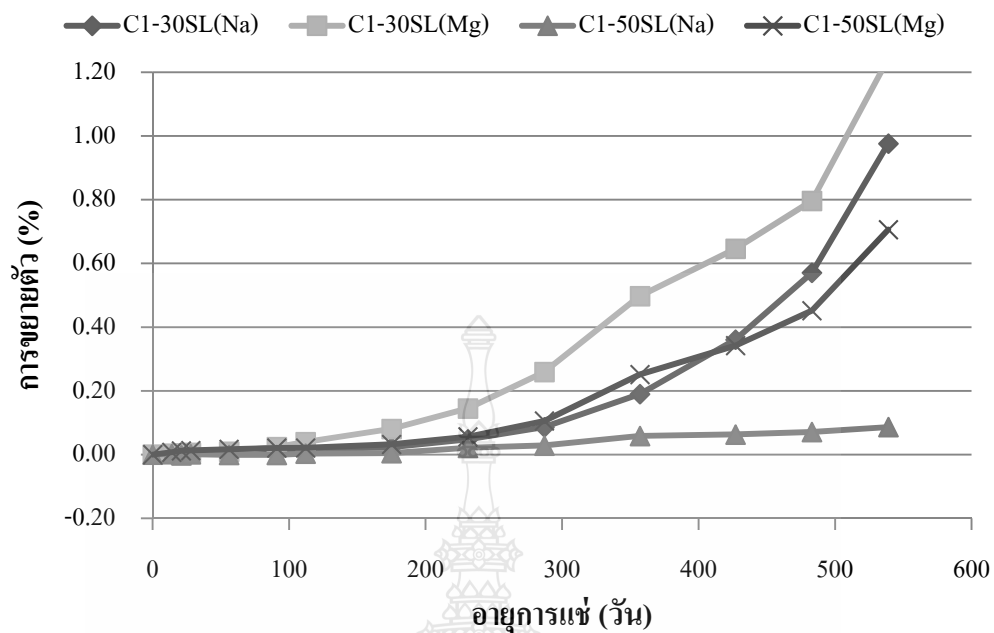
ค) ผสมถั่วลยร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5



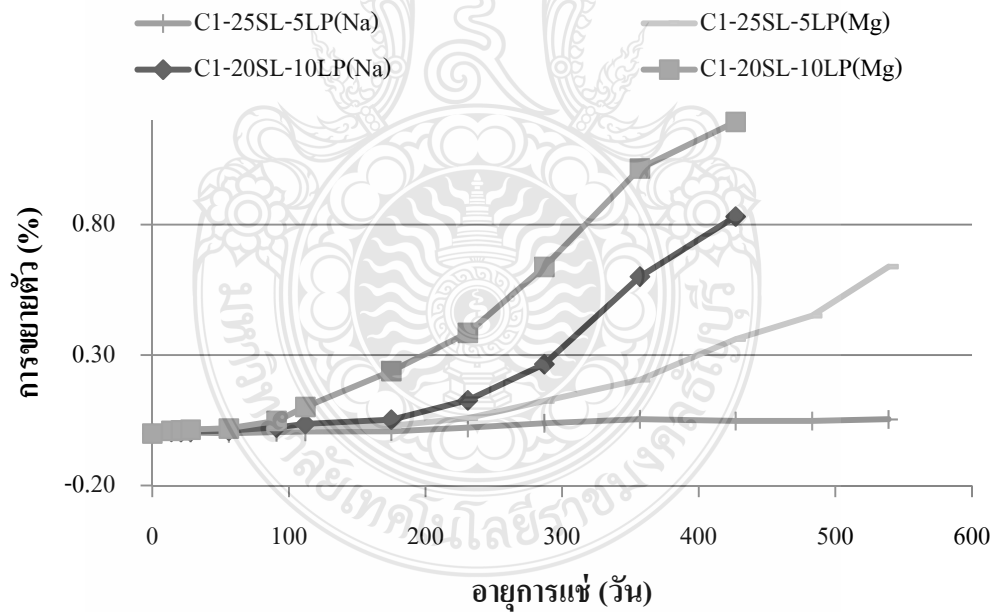
ง) ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย ร่วมกับผงหินปูน

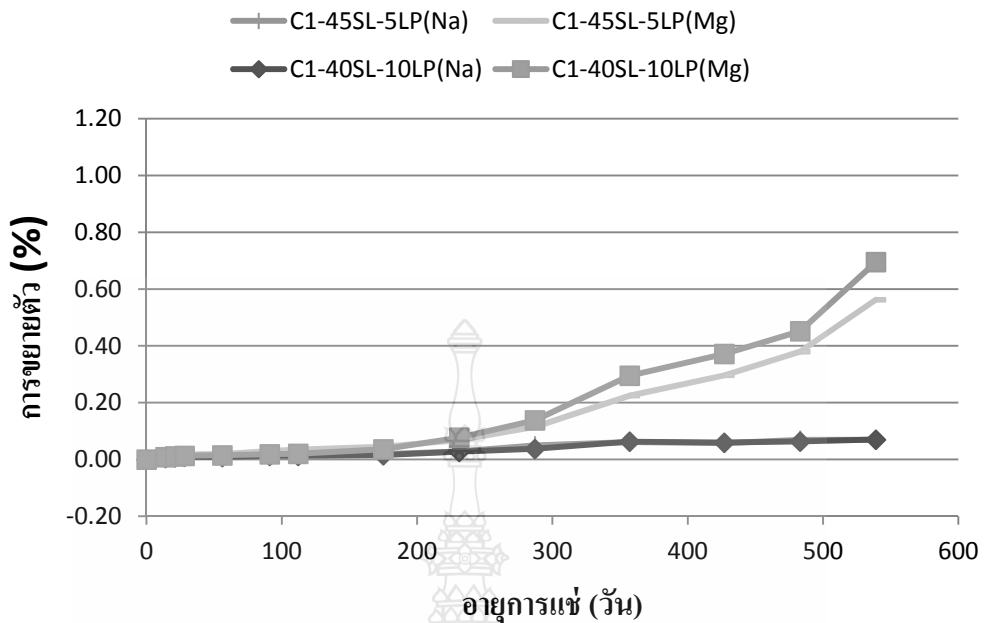
4.1.3.2 เมื่อแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 25 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก และแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 40 และ 45 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก รูปที่ 4.21 พบว่า การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในแมกนีเซียมซัลเฟต จะมีค่ามากกว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสายละลายโซเดียมซัลเฟต ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการทำลายของสารแมกนีเซียมซัลเฟตในระยะแรกๆ จะมีความรุนแรงและเกิดการบวมของตัวอย่างมอร์ต้าร์จึงส่งผลให้ค่าการขยายตัวมีค่ามากกว่า



ก) ผสมตะกอนเตาดุลงเหล็กกับคละเอียดย่อยละ 30 และ 50



ข) ผสมตะกอนเตาดุลงเหล็กกับคละเอียดย่อยละ 20 และ 25 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10

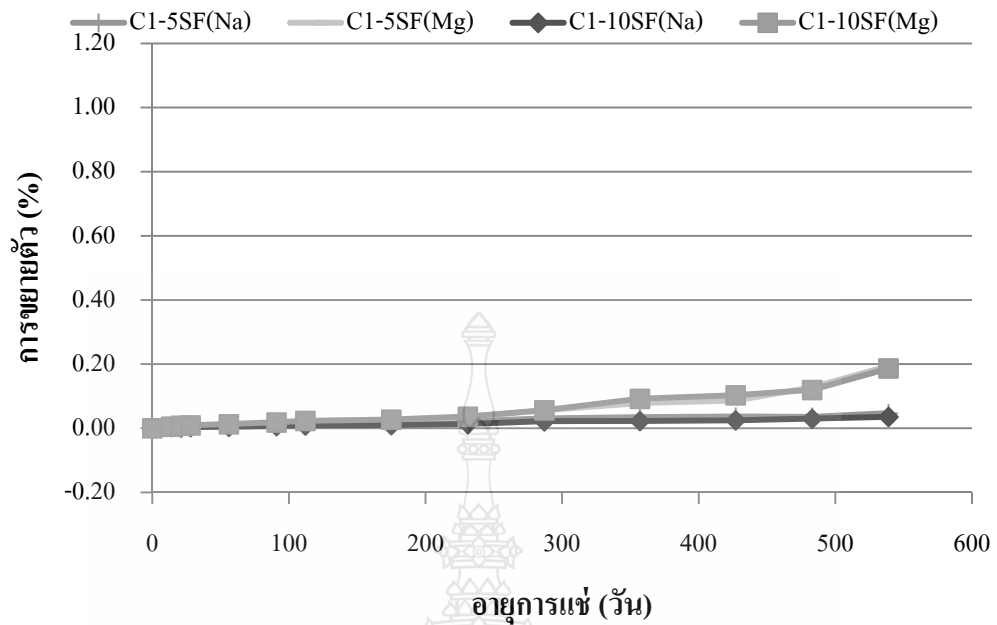


ค) ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 40 และ 45 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10

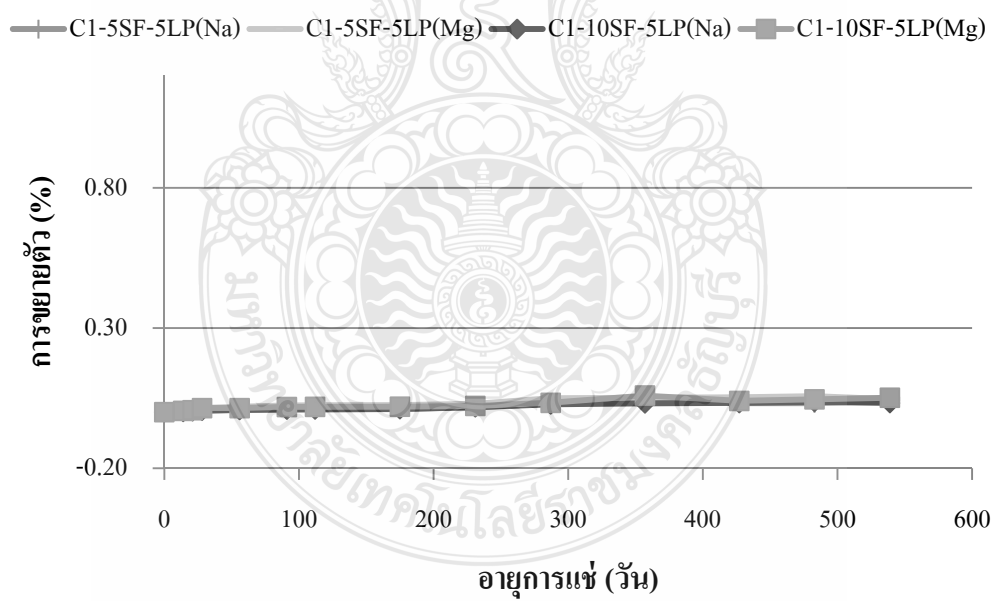
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างของมอร์ต้าร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและมอร์ต้าร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน

4.1.3.3 เมื่อแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก และแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.22 แสดงผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยซิลิกาฟูมในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 และ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย ซิลิกาฟูมในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 พบว่า ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าการขยายตัวที่ใกล้เคียงกันทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ซิลิกาฟูมในตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าค่อนข้างน้อยจึงทำให้ไม่เห็นความแตกต่างรวมทั้งอายุการแช่สารละลายของตัวอย่างยังน้อยจึงทำให้ไม่เห็นความแตกต่างของการขยายตัว



ก) ผสมซีลีกาฟุ่มร้อยละ 5 และ 10



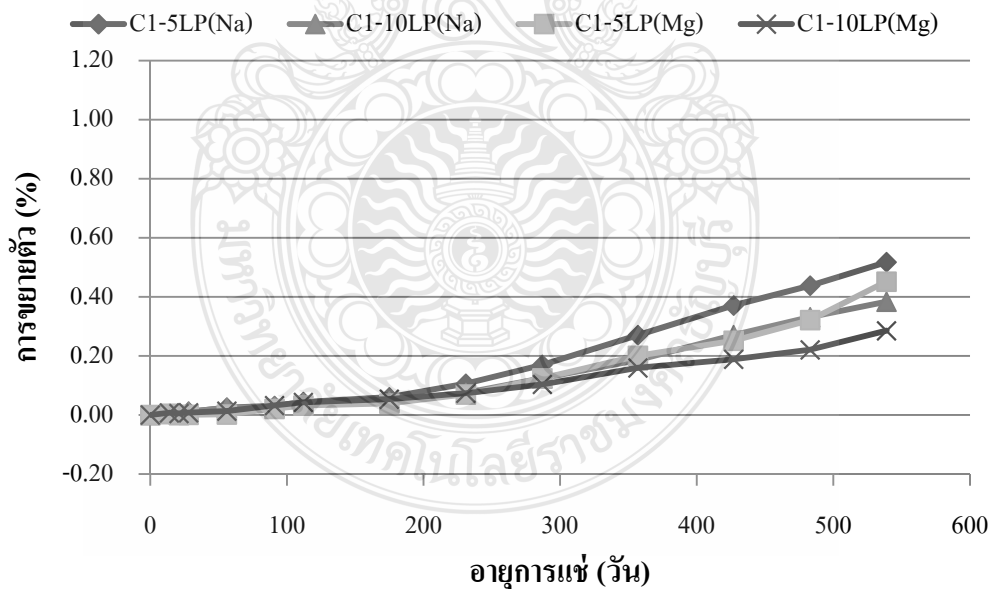
ข) ผสมซีลีกาฟุ่มร้อยละ 5 และ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างของมอร์ต้าร์ผสมซีลีกาฟุ่มและมอร์ต้าร์ผสมซีลีกาฟุ่มร่วมกับผงหินปูน

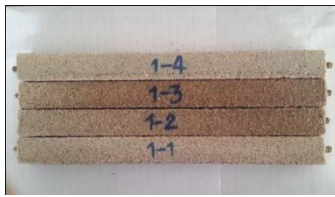
4.1.3.4 เมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.23 แสดงผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 พบว่า มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่ามากกว่าสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตทั้งนี้เนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะทำให้เกิด Ettringite ซึ่งมีคุณสมบัติในการขยายตัวมากกว่าสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ส่วนรูปที่ 4.24 ถึง 4.25 แสดงตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการวัดการคายน้ำในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและโซเดียมซัลเฟต จากรูปจะเห็นได้ว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น ที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ได้เกิดการหลุดร่อนออกซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีกลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต แต่ในส่วนของตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น ที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ไม่เกิดการหลุดร่อนซึ่งก็สอดคล้องกับทฤษฎีกลไกการทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟต ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูน



C1



C5



C1-20FA



C1-40FA



C1-30SL



C1-50SL



C1-5LP



C1-10LP



C1-15FA-5LP



C1-10FA-10LP



C1-35FA-5LP



C1-30FA-10LP



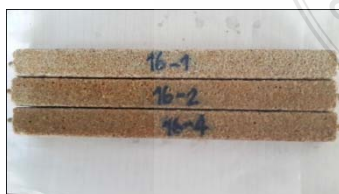
C1-25SL-5LP



C1-20SL-10LP



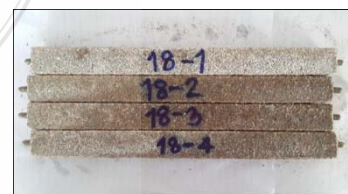
C1-45SL-5LP



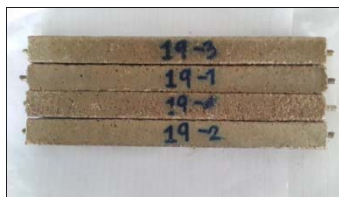
C1-40SL-10LP



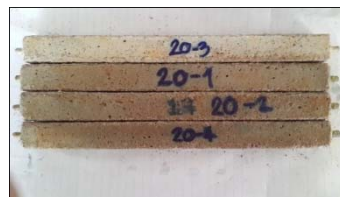
C1-5SF



C1-10SF



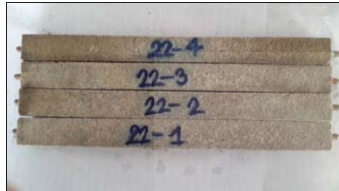
C1-5SF-5LP



C1-10SF-5LP



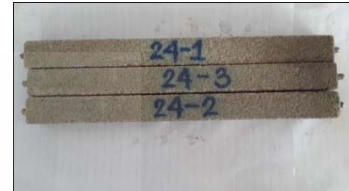
C1-20FB



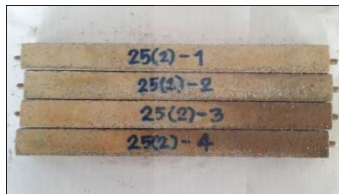
C1-20FC



C1-20FD



C1-40FB



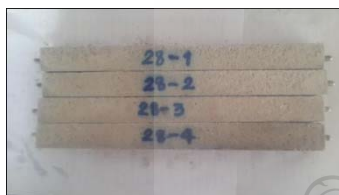
C1-40FC



C1-40FD



C1-15FB-5LP



C1-15FC-5LP



C1-15FD-5LP



C1-30FB-10LP



C1-30FC-10LP



C1-30FD-10L

รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ทที่วัดค่าการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 61 สัปดาห์



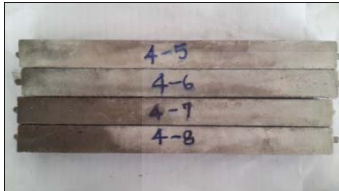
C1



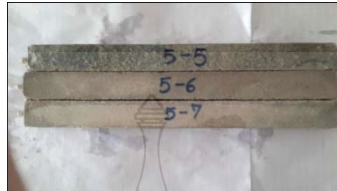
C5



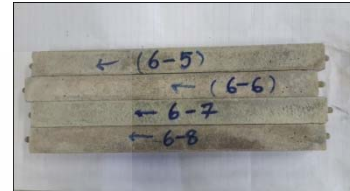
C1-20FA



C1-40FA



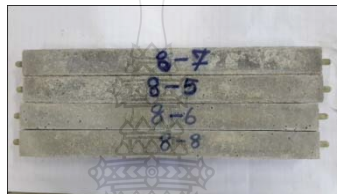
C1-30SL



C1-50SL



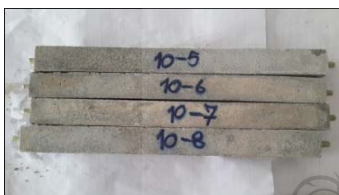
C1-5LP



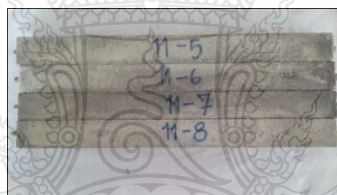
C1-10LP



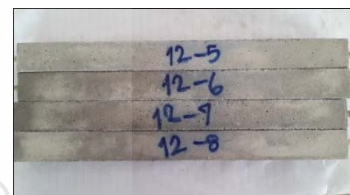
C1-15FA-5LP



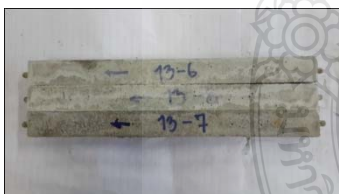
C1-10FA-10LP



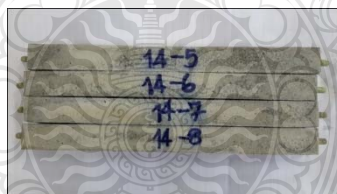
C1-35FA-5LP



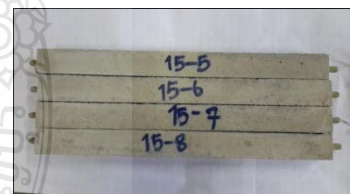
C1-30FA-10LP



C1-25SL-5LP



C1-20SL-10LP



C1-45SL-5L



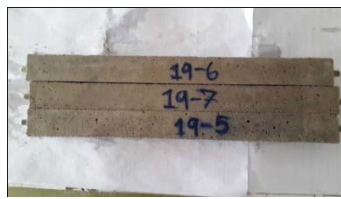
C1-40SL-10LP



C1-5SF



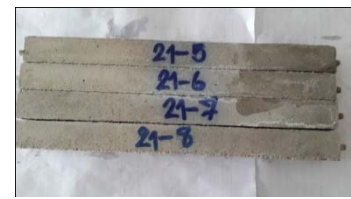
C1-10SF



C1-5SF-5LP



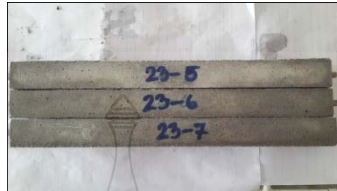
C1-10SF-5LP



C1-20FB



C1-20FC



C1-20FD



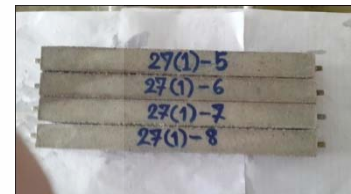
C1-40FB



C1-40FC



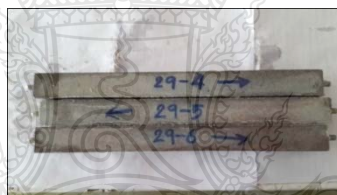
C1-40FD



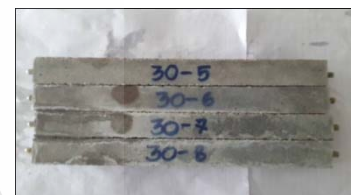
C1-15FB-5LP



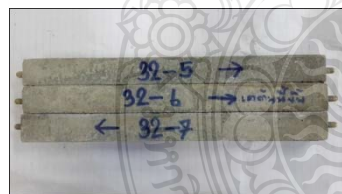
C1-15FC-5LP



C1-15FD-5LP



C1-30FB-10LP



C1-30FC-10LP



C1-30FD-10LP

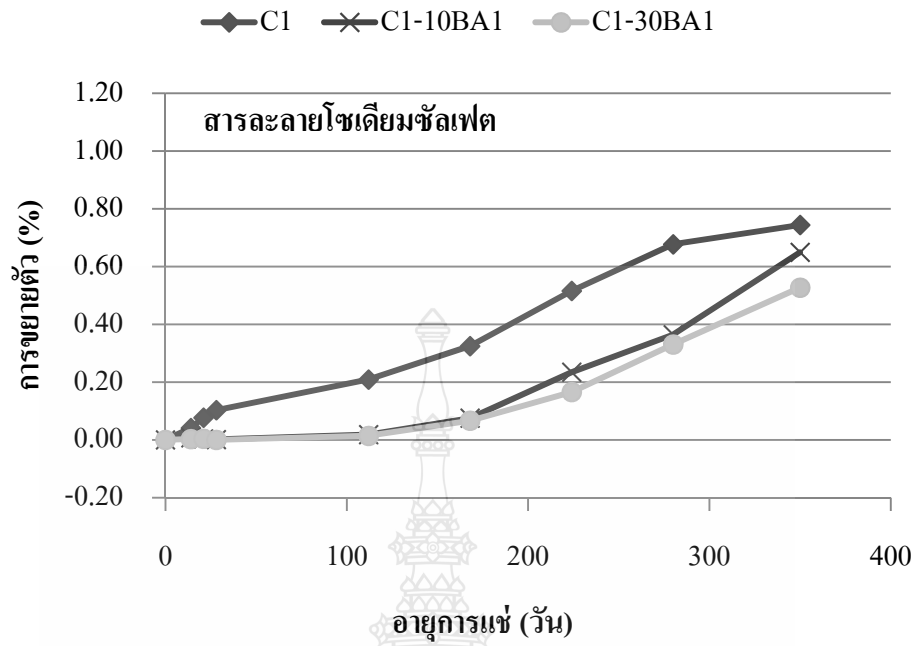
รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ที่วัดค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 61 สัปดาห์

4.1.4 ผลกระทบเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียดต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์

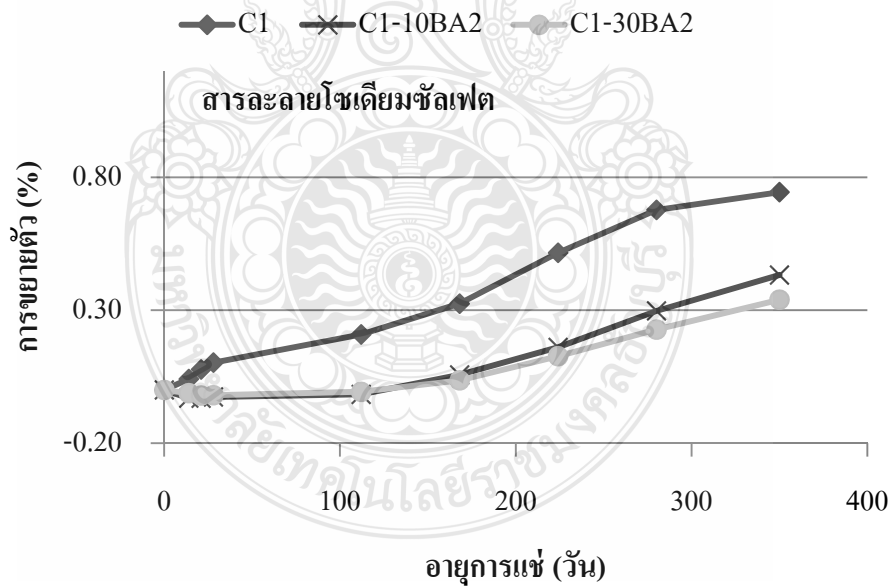
สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ได้แก่ ปูนซีเมนต์แลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน แทนที่ในปูนซีเมนต์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 40, 50, และ 10 ตามลำดับ ส่วนเถ้าก้นเตาใช้แทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร มี 3 ชนิด คือ BA1, BA2, และ BA3

4.1.4.1 กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

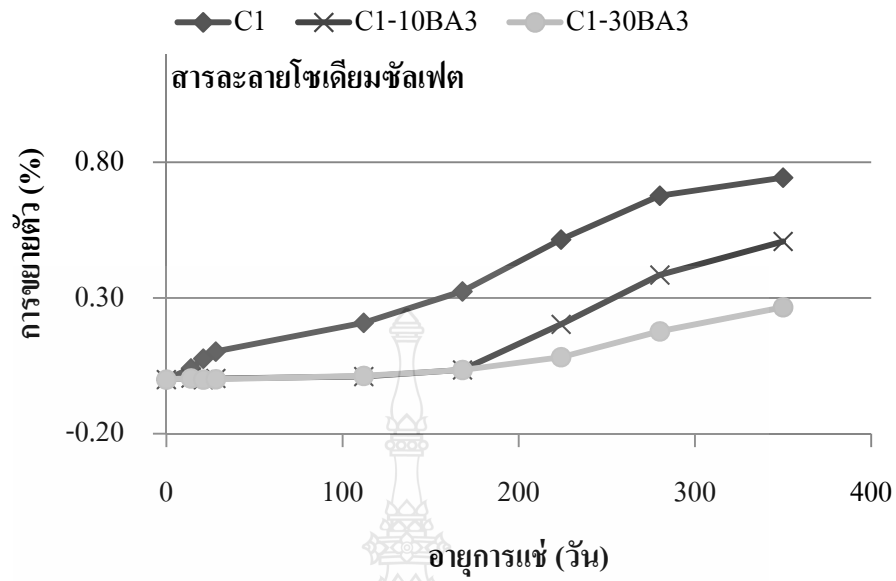
จากรูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อใช้เถ้าก้นเตาชนิดที่ BA1, BA2 และ BA3 แทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร ซึ่งจะเห็นการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกล่าวคือ การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนที่ใช้ทรายล้วนมีค่าการขยายตัวมากกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อใช้เถ้าก้นเตาทั้ง 3 ชนิด แทนที่ในมวลรวมละเอียด โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่อใช้เถ้าก้นเตาสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้บางส่วน (ส่วนที่มีความละเอียด) จึงสามารถช่วยลดปริมาณ Ca(OH)_2 จึงทำให้เกิดปริมาณยิปซัมและ Ettringite น้อยลง ทำให้การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตรมีค่าการขยายตัวน้อยกว่าของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน อย่างไรก็ตามสังเกตว่าค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาทั้ง 3 ชนิด ในส่วนผสมของคอนกรีตมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน



ก) ถ้ำกั้นเตา BA1



ข) ถ้ำกั้นเตา BA2



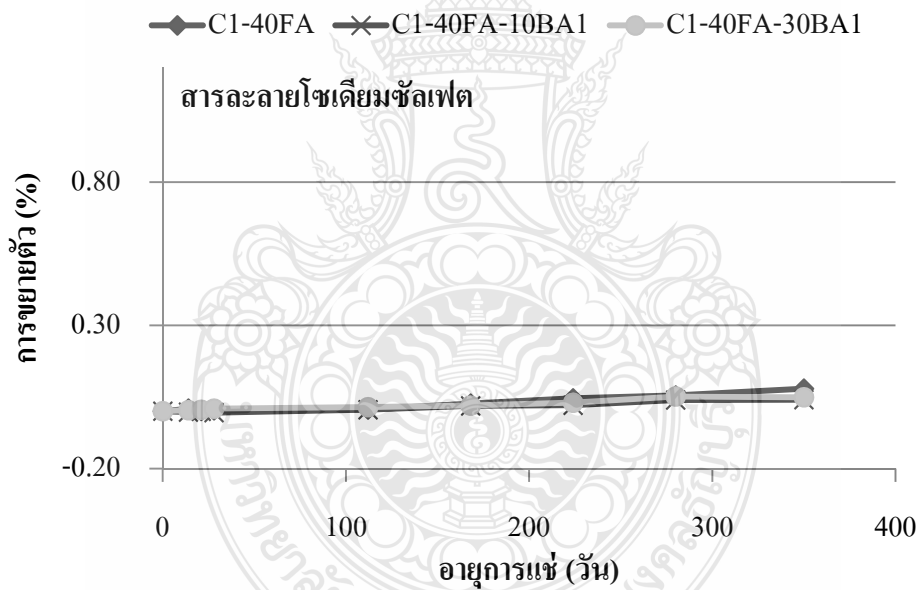
ค) ถ้ำกั้นเตา BA3

รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน เมื่อใช้ทรายล้วนและมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร

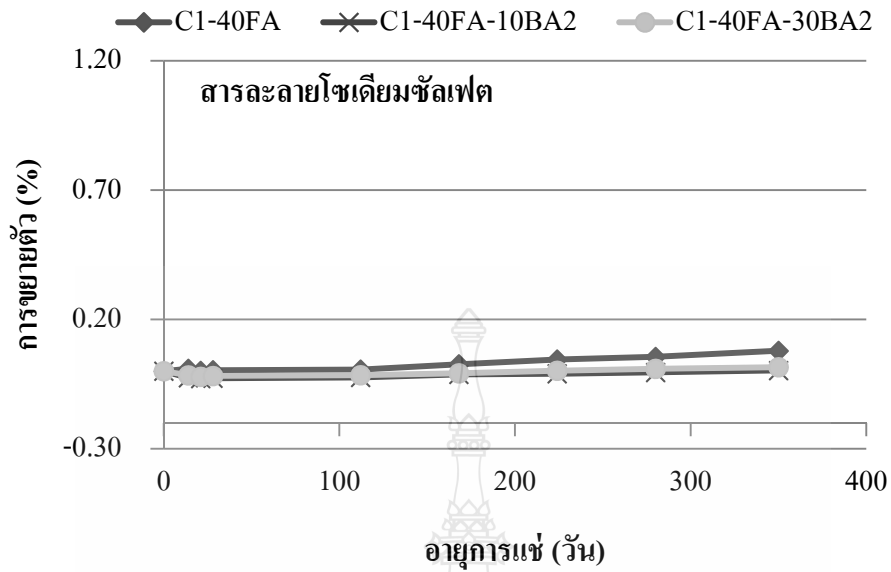


1) พิจารณาในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้ทรายล้วนและผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้เถ้าก้นเตาทั้ง 3 ชนิดแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร

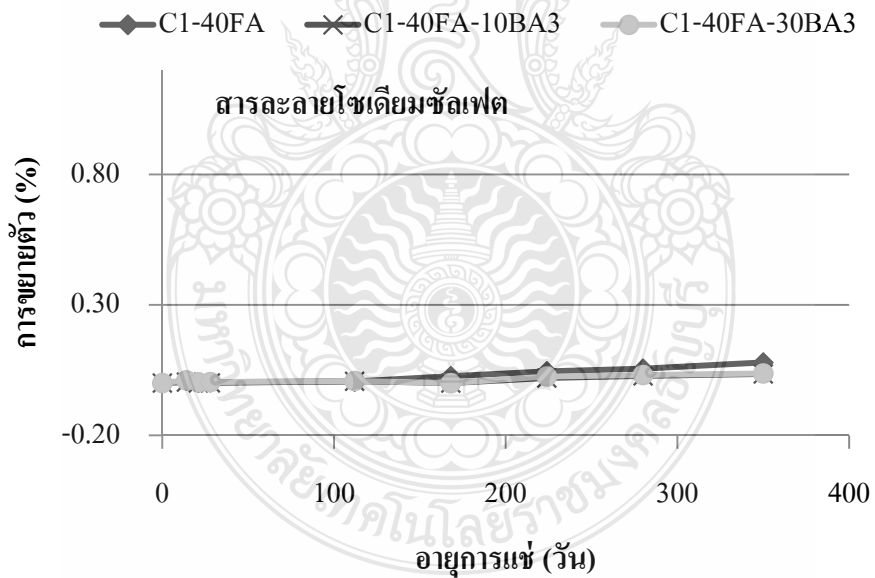
รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้ทรายล้วนและตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้เถ้าก้นเตาชนิดที่ 1, 2, และ 3 แทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้ทรายล้วนมีค่าการขยายตัวมากกว่าของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้เถ้าก้นเตาทั้ง 3 ชนิดแทนที่ในมวลรวมละเอียด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่อใช้เถ้าก้นเตาสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้บางส่วน(ส่วนที่มีความละเอียด)ได้เปลี่ยนรูปของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ให้เป็น CSH จึงทำให้เกิดปริมาณยิปซัมและ Ettringite น้อยลง



ก) เถ้าก้นเตา BA1



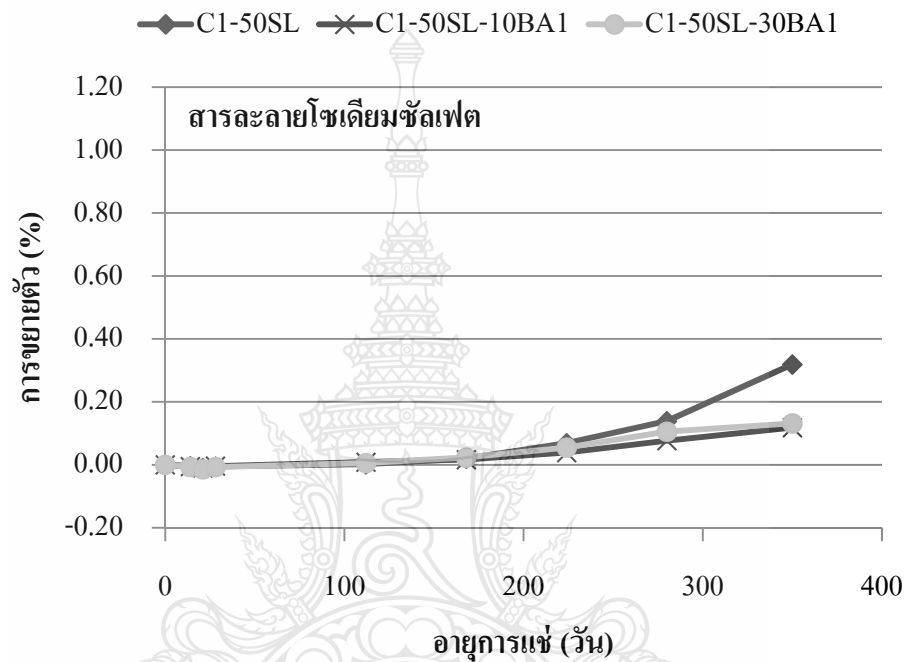
ข) ถ้ำกั้นเตา BA2



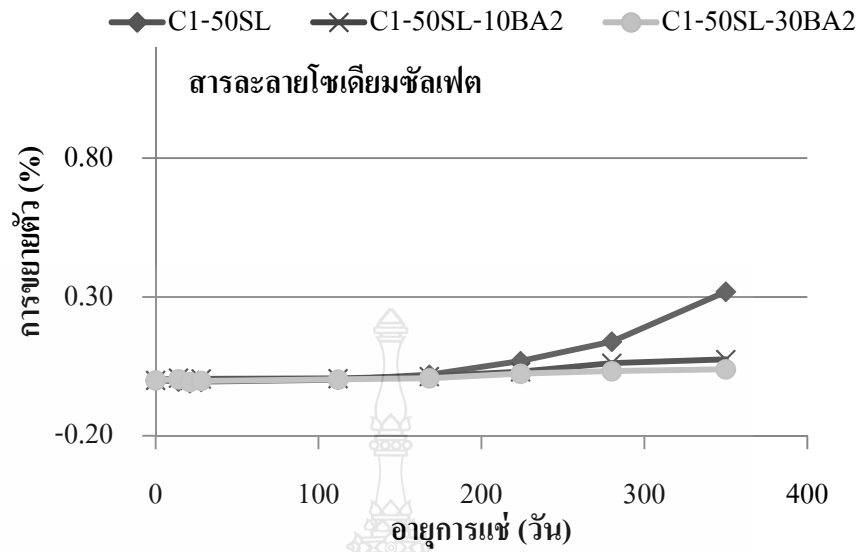
ค) ถ้ำกั้นเตา BA3

รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมถ้ำลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้ทรายล้วนและมอร์ต้าร์ผสมถ้ำลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร

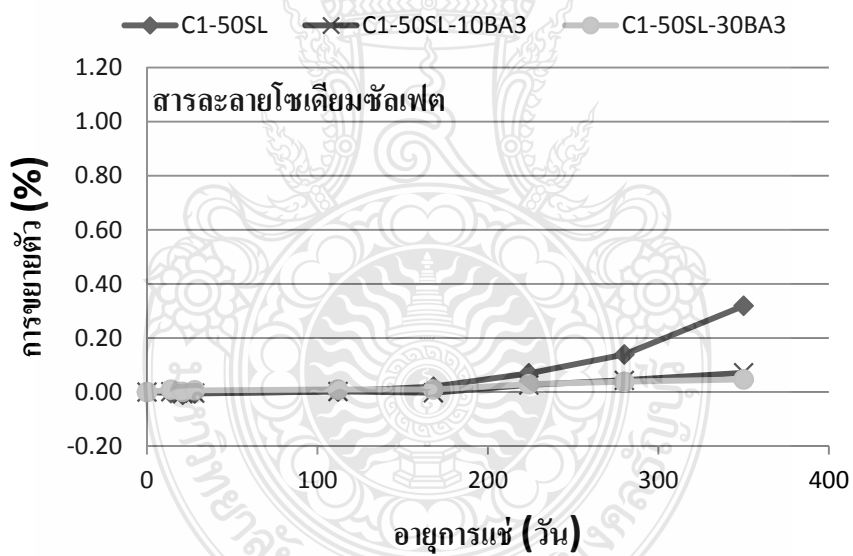
2) พิจารณาเมื่อใช้ทรายล้วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 เมื่อใช้ทรายล้วนและผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาทั้ง 3 ชนิดแทนที่ ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร ดังแสดงดังรูปที่ 4.28 พบว่า ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ในทรายจะให้ค่าการขยายตัวที่น้อยกว่าเมื่อใช้ทรายล้วน ทั้งนี้เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



ก) ถ้ำกั้นเตา BA1



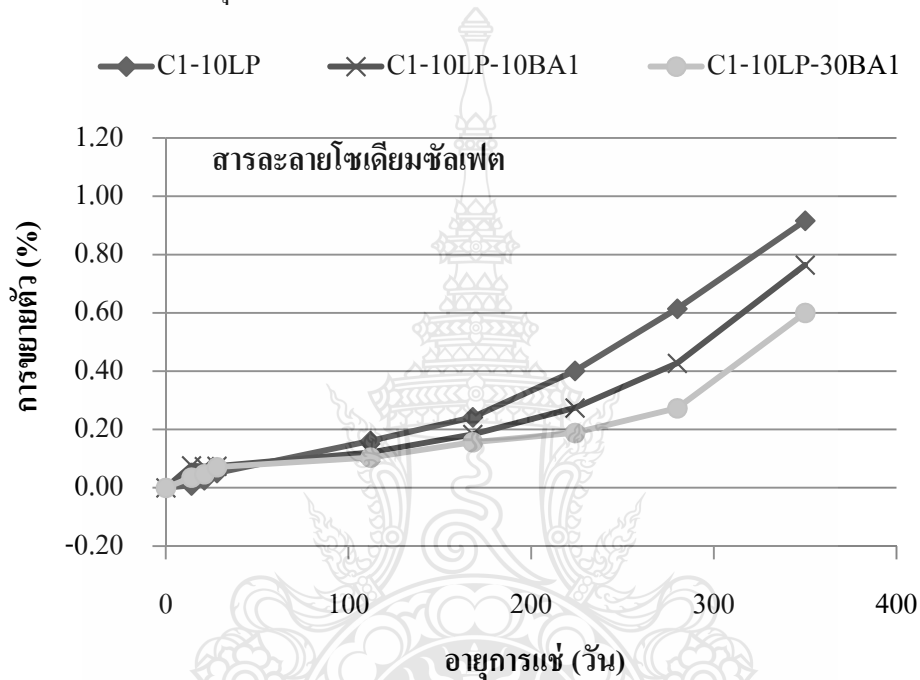
ข) ถ้ำกั้นเตา BA2



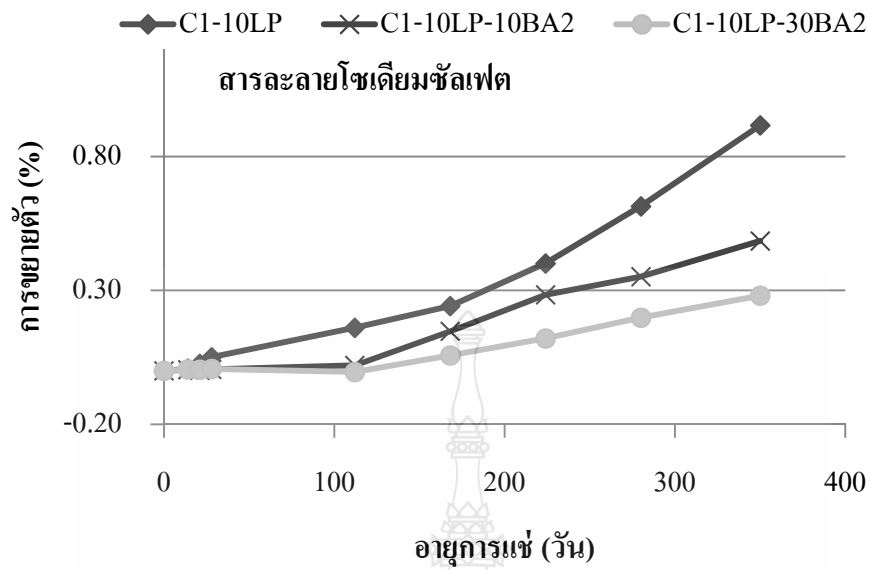
ค) ถ้ำกั้นเตา BA3

รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 และมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร

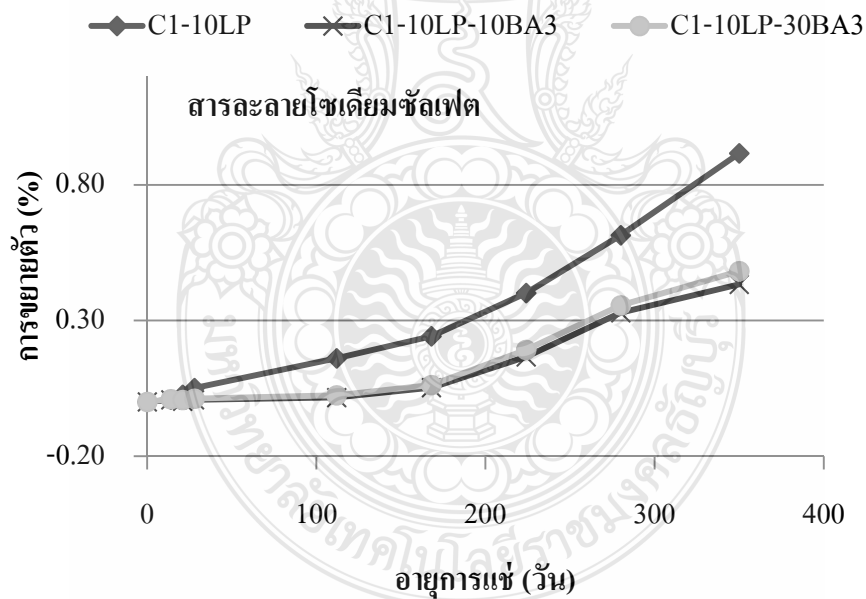
3) พิจารณาในผสมผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อใช้เถ้าก้นเตาทั้ง 3 ชนิดแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร แสดงดังรูปที่ 4.29 ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ในทรายจะให้ค่าการขยายตัวที่น้อยกว่าเมื่อใช้ทรายล้วนทั้งนี้เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เช่นเดียวกับการณ์ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและมอร์ต้าร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด



ก) เถ้าก้นเตา BA1



ข) เติ้ากั้นเตา BA2



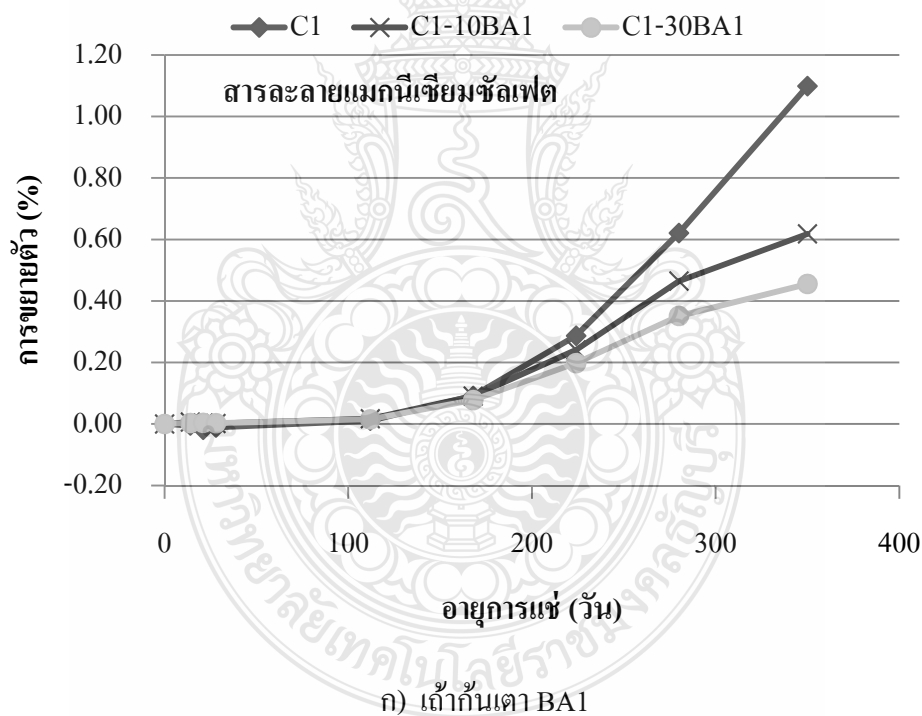
ค) เติ้ากั้นเตา BA3

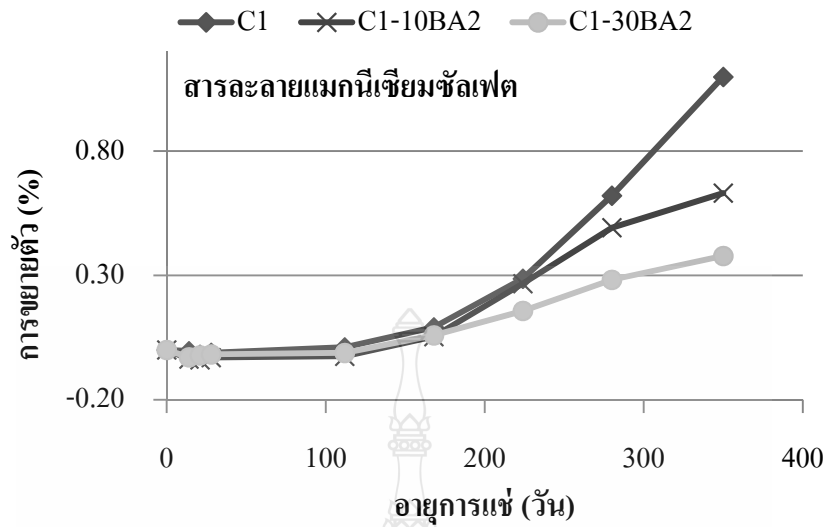
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ทผสมผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและมอร์ตาร์ทผสมผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อใช้เติ้ากั้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร

4.1.4.2 กรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

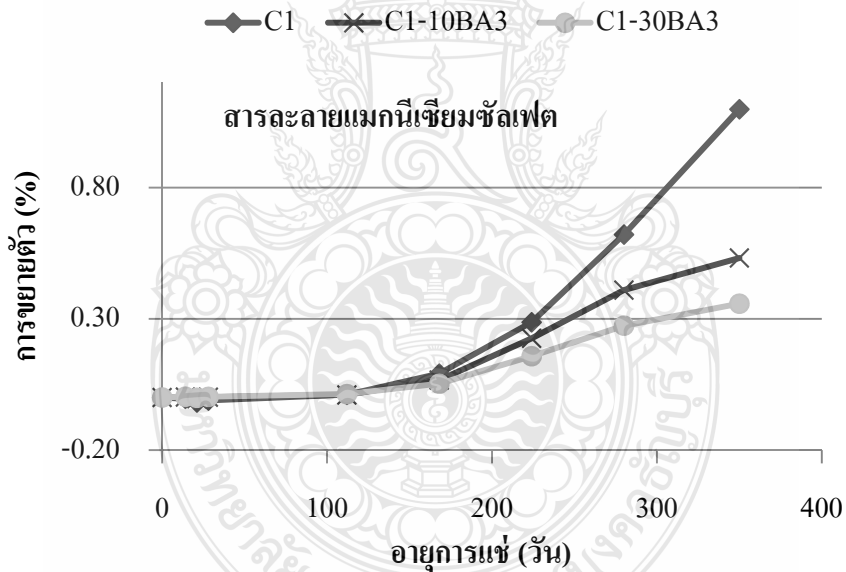
1) พิจารณาในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนเมื่อใช้ทรายล้วนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนเมื่อใช้ถ้ำกันเตาทั้ง 3 ชนิดแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร

จากรูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อใช้ทรายล้วนและมอร์ต้าร์ใช้ถ้ำกันเตาชนิดที่ BA1, BA2 และ BA3 แทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร พบว่า การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อใช้ทรายล้วนมีค่าการขยายตัวมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อใช้ถ้ำกันเตาทั้ง 3 ชนิดแทนที่ในมวลรวมละเอียด ทั้งนี้เนื่องด้วยเหตุผลเดียวกับในกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟต





ข) แก้วกันเตา BA2

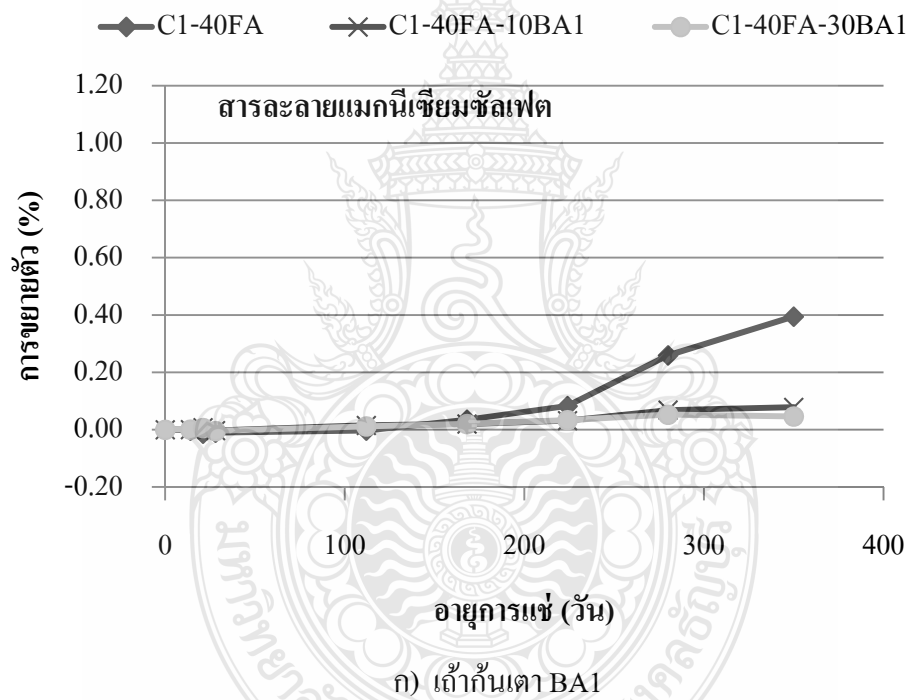


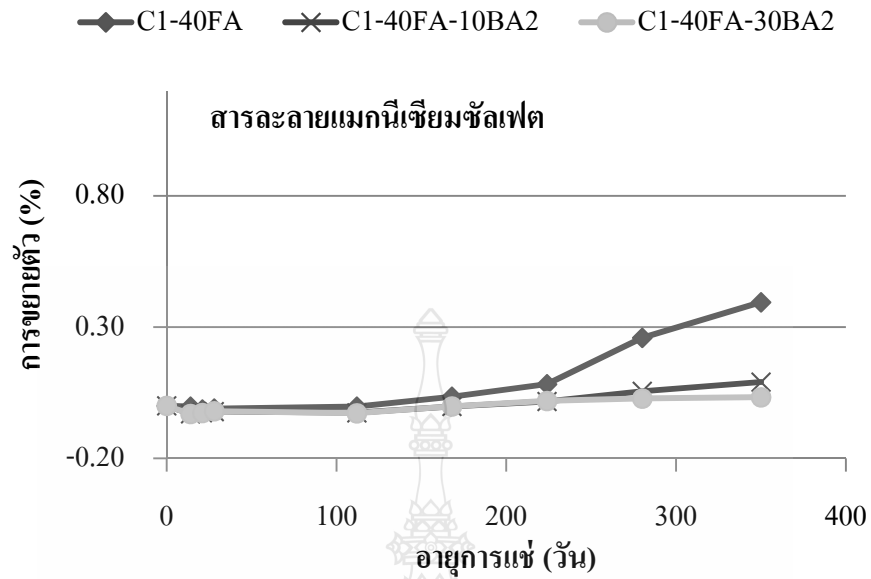
ค) แก้วกันเตา BA3

รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อใช้ทรายล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อใช้แก้วกันเตาแทนที่ในมวลรวม ละเอียดย้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร

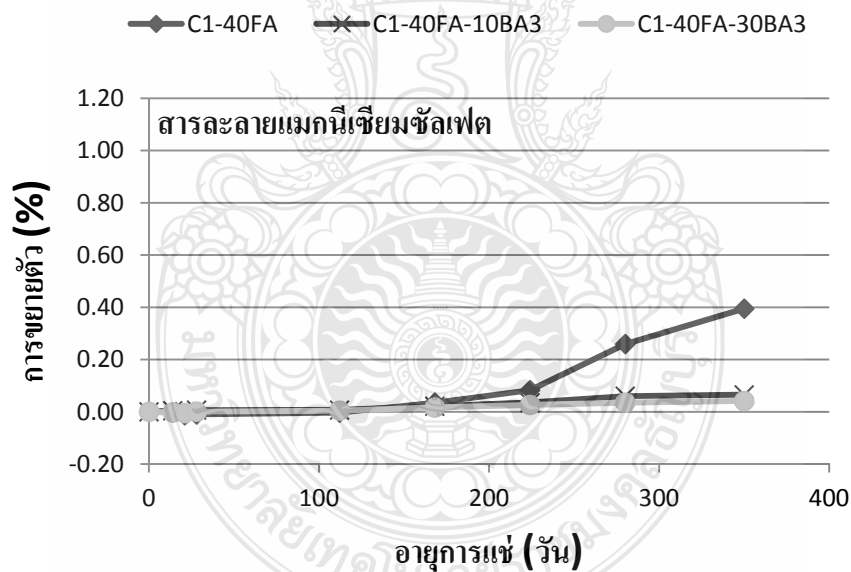
2) พิจารณามอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้ทรายล้วนและมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้เถ้ากั้นเตาทั้ง 3 ชนิดแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร

รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้ทรายล้วนและมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้เถ้ากั้นเตาชนิดที่ 1, 2, และ 3 แทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้ทรายล้วนมีค่ามากกว่าของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้เถ้ากั้นเตาทั้ง 3 ชนิดแทนที่ในมวลรวมละเอียด ทั้งนี้เนื่องด้วยเหตุผลเดียวกับในกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟต





ข) ถ้ำกั้นเตา BA2

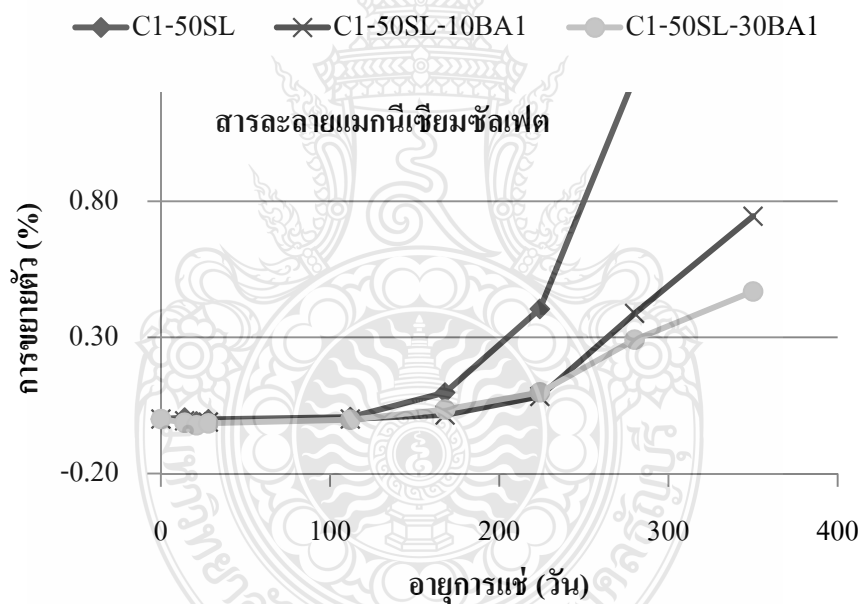


ค) ถ้ำกั้นเตา(BA3)

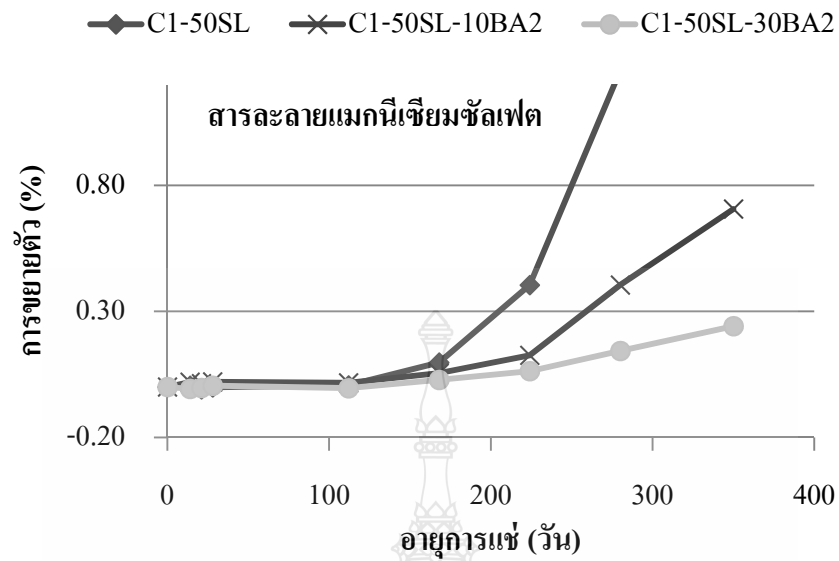
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้ทรายล้วนและมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย ร้อยละ 40 เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร

3) พิจารณามอร์ตาร์ดผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 เมื่อใช้ทรายล้วนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาทั้ง 3 ชนิดแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร

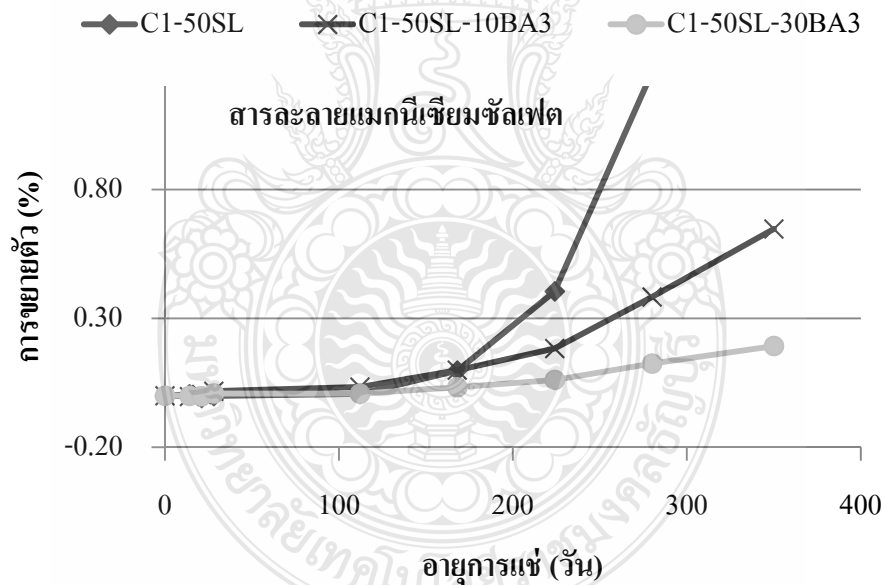
รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ดกับอายุในการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ดผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 เมื่อใช้ทรายล้วนและตัวอย่างผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาชนิดที่ 1, 2, และ 3 แทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ดผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 เมื่อใช้ทรายล้วนมีค่าการขยายตัวมากกว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ดผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาทั้ง 3 ชนิดแทนที่ในมวลรวมละเอียด ทั้งนี้เนื่องด้วยเหตุผลเดียวกับในกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟต



ก) ถ้ำกั้นเตา BA1



ข) แก้วกันเตา BA2

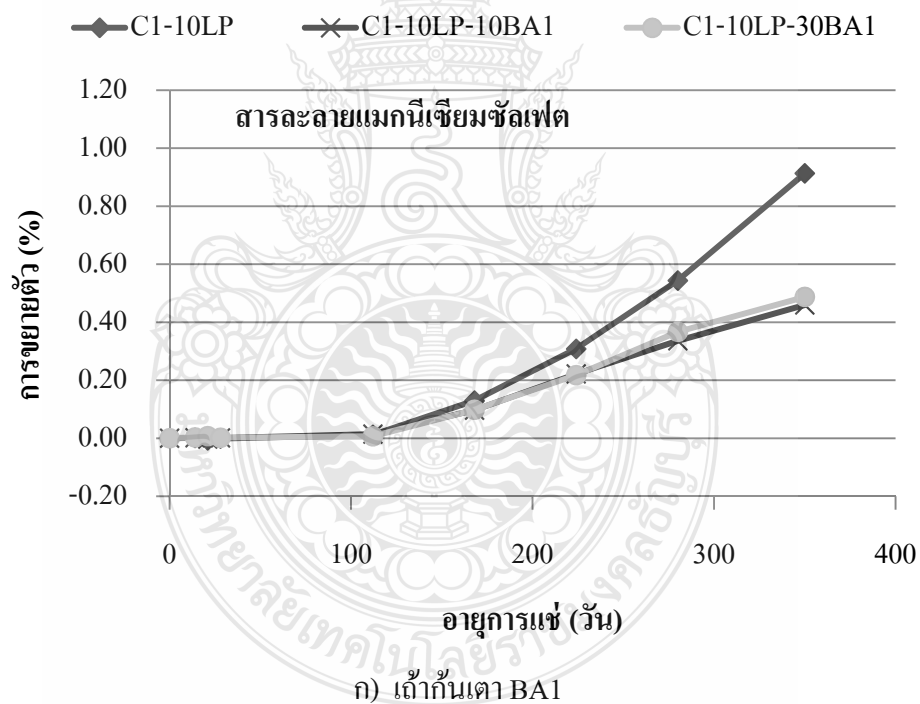


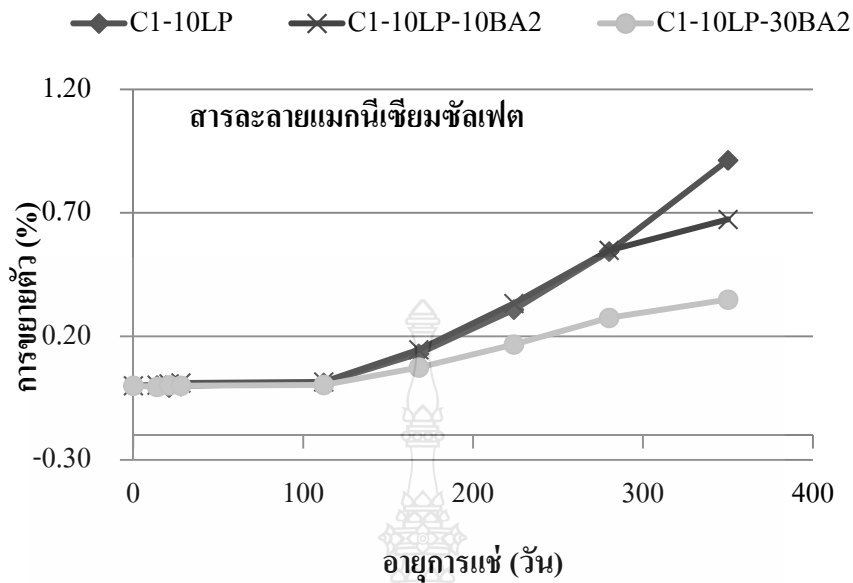
ค) แก้วกันเตา BA3

รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 เมื่อใช้ทรายล้วนและมอร์ต้าร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 เมื่อใช้แก้วกันเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร

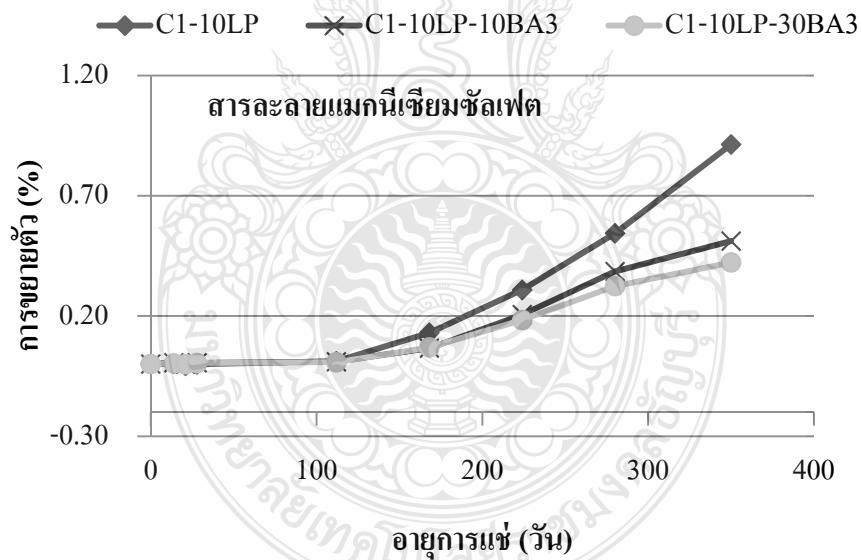
4) พิจารณาในมอร์ตาร์ดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและมอร์ต้าผสมผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาทั้ง 3 ชนิดแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร

รูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ดกับอายุในการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและตัวอย่างมอร์ตาร์ดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาชนิดที่ 1, 2, และ 3 แทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร พบว่า การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนมีค่าการขยายตัวมากกว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาทั้ง 3 ชนิดแทนที่ในมวลรวมละเอียด ทั้งนี้เนื่องด้วยเหตุผลเดียวกับในกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟต





ข) ถ้ำกั้นเตา BA2



ค) ถ้ำกั้นเตา BA3

รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ตาร์ใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร

ส่วนรูปที่ 4.34 ถึง 4.35 แสดงตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อใช้เก้าอี้แทนที่ในทรายที่ใช้ในการวัดค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต จากรูปจะเห็นว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่ผิวนอกของมอร์ต้าร์ไม่เกิดการหลุดร่อนซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟต แต่ในส่วนของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้นที่ผิวนอกของมอร์ต้าร์ได้เกิดการหลุดร่อนออกซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น



C1



C1-10BA1



C1-10BA2



C1-10BA3



C1-30BA1



C1-30BA2



C1-30BA3



C1-40FA



C1-40FA-10BA1



C1-40FA-10BA2



C1-40FA-10BA3



C1-40FA-30BA1



C1-40FA-30BA2



C1-40FA-30BA3



C1-50SL



C1-50SL-10BA1



C1-50SL-10BA2



C1-50SL-10BA3



C1-50SL-30BA1



C1-50SL-30BA2



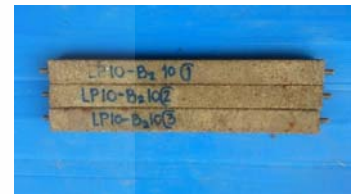
C1-50SL-30BA3



C1-10LP



C1-10LP-10BA1



C1-10LP-10BA2



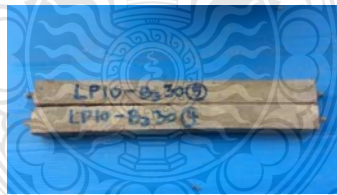
C1-10LP-10BA3



C1-10LP-30BA1



C1-10LP-30BA2



C1-10LP-30BA3

รูปที่ 4.34 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ดที่วัดค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



C1



C1-10BA1



C1-10BA2



C1-10BA3



C1-30BA1



C1-30BA2



C1-30BA3



C1-40FA



C1-40FA-10BA1



C1-40FA-10BA2



C1-40FA-10BA3



C1-40FA-30BA1



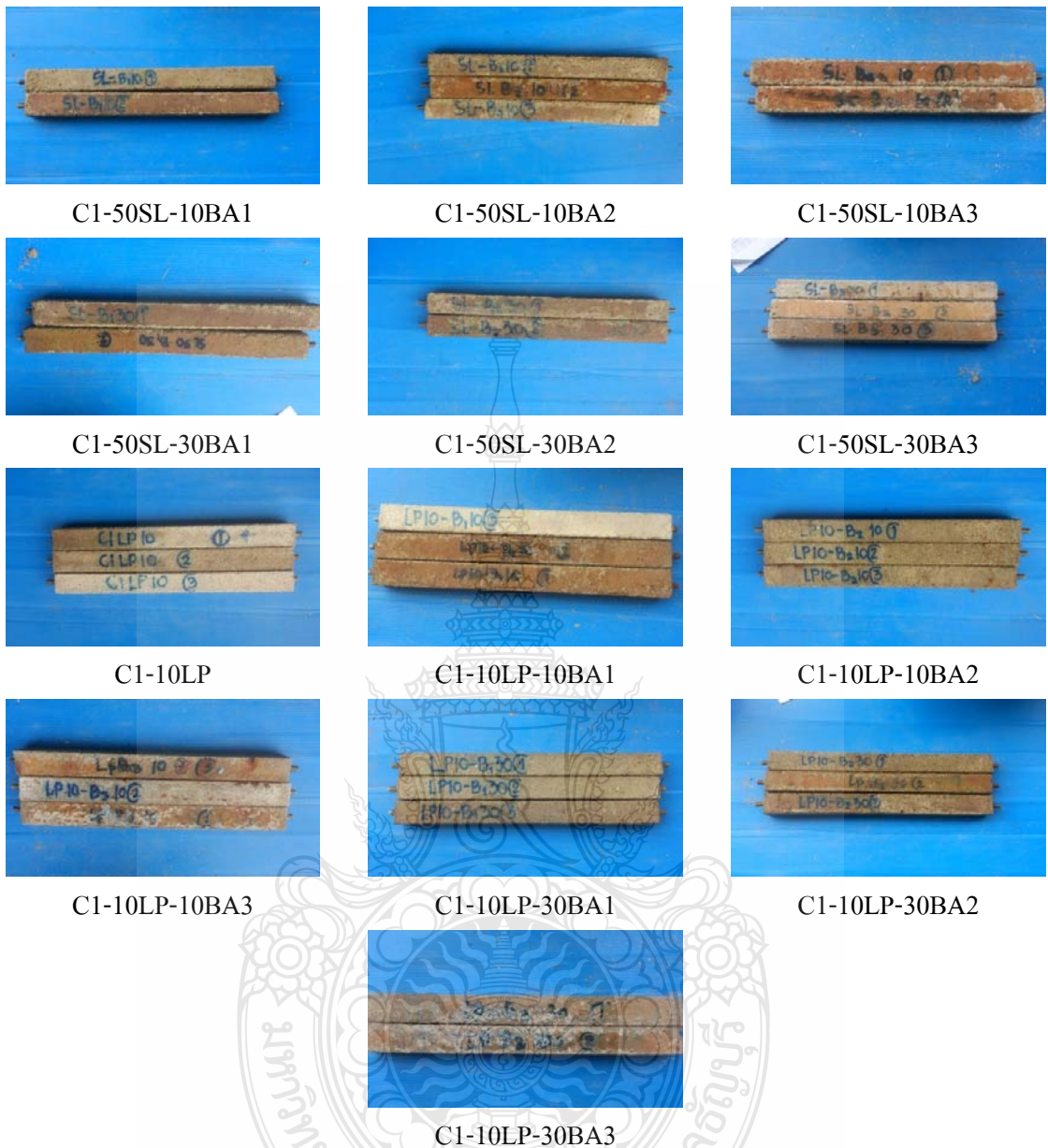
C1-40FA-30BA2



C1-40FA-30BA3



C1-50SL



รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ที่วัดค่าการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

4.2 การสูญเสียน้ำหนัก

การประเมินผลการต้านทานซัลเฟตโดยวัดการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) ของชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์เฉพาะในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเท่านั้น ซึ่งได้พิจารณาถึง 1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน 2) ผลกระทบของชนิดของเกลือ และ 3) ผลกระทบของแฉกัณฑ์ต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์โดยมีรายละเอียดดังนี้

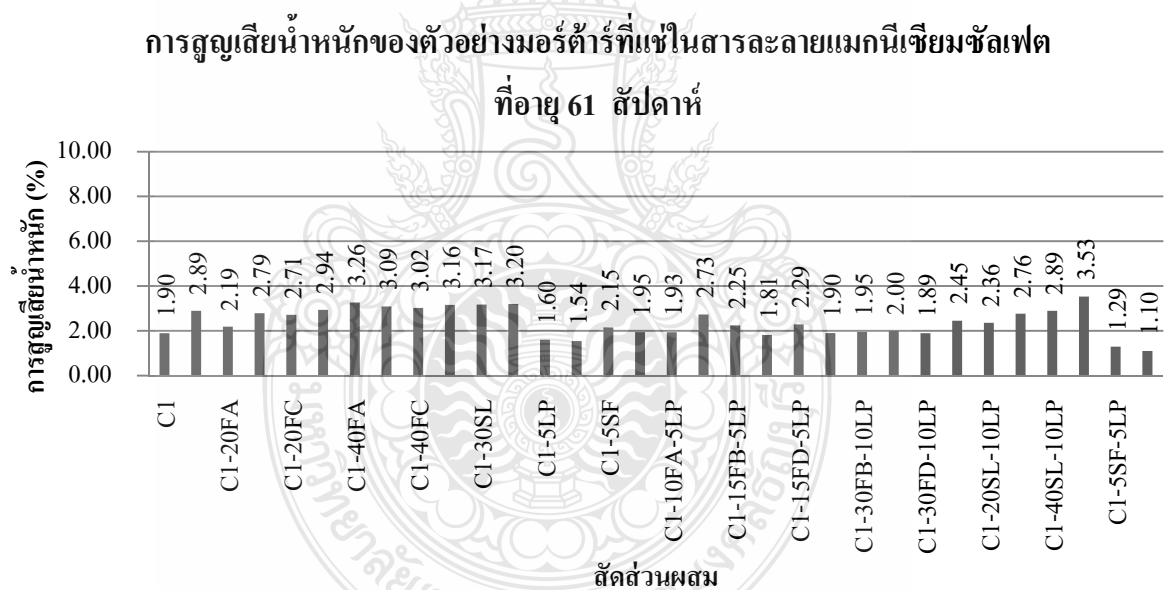
4.2.1 ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์

สำหรับชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานที่ใช้พิจารณาถึงผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น วัสดุประสานใช้เหมือนกับกรณีของการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ดังที่ได้กล่าวมา คือ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด (FA, FB, FC และ FD) ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 มอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในอัตราส่วน 30 และ 50 มอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูมอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 และ มอร์ตาร์ผสมผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 รวมทั้งมอร์ตาร์กรณี 3 วัสดุประสาน ได้แก่ มอร์ตาร์ผสมที่เถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด (FA, FB, FC และ FD) ร่วมกับผงหินปูน มอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน และ มอร์ตาร์ผสมแทนที่ซิลิกาฟูมร่วมกับผงหินปูน

รูปที่ 4.36 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 61 สัปดาห์ พบว่า การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วนมีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีความพรุนมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้สารละลายซัลเฟตเข้าไปทำลายได้มากขึ้น ส่วนแทนที่เถ้าลอย FA, FB, FC และ FD ไม่ว่าจะป็นร้อยละ 20 และ 40 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เนื่องจากผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ความเป็นด่างใน มอร์ตาร์น้อยลง (ลด $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ จึงทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CSH) เปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสานโดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้น

ส่วนการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงบดละเอียด ไม่ว่าจะป็นร้อยละ 30 และ 50 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่ามากกว่า มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้ก็เนื่องด้วยเหตุผลเดียวกับในกรณีของเถ้าลอย และการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่า การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์มีค่าใกล้เคียงมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้จะสังเกตว่า แม้ว่าซิลิกาฟูมจะเป็นสารปอซโซลานดังนั้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ความเป็นด่างในมอร์ตาร์น้อยลง (ลด $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ แต่เนื่องจาก ซิลิกาฟูมมีความละเอียดค่อนข้างสูง จึง

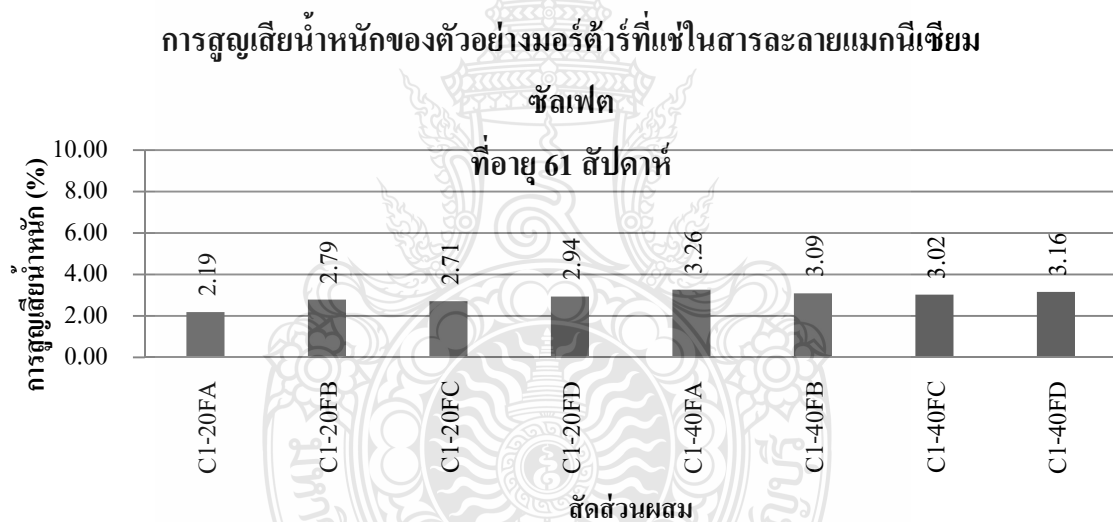
สามารถไปเติมเต็มช่องว่างในมอร์ตาร์ จึงทำให้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ยากขึ้น โดยที่อัตราส่วนในการแทนร้อยละ 5 และ 10 นั้น มีค่าการสูญเสียน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน ส่วนการแทนที่ด้วยผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่า การสูญเสียน้ำหนักมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ผงหินปูนสามารถไปเติมเต็มช่องว่างในมอร์ตาร์ จึงทำให้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ยากขึ้น สำหรับการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์เมื่อมีการผสมร่วมกับการแทนที่ 3 วัสดุประสาน พบว่า การสูญเสียน้ำหนักมีน้อยกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ยกเว้นกรณีเมื่อแทนที่ด้วยถ้ำลอย FA, FB, FC และ FD ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และกรณีเมื่อแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 5 และร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะการแทนที่ผงหินปูนสามารถไปเติมเต็มช่องว่างในมอร์ตาร์จึงทำให้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ยากขึ้น ทำให้การสูญเสียมีค่าน้อย



รูปที่ 4.36 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 61 สัปดาห์

4.2.2 ผลกระทบจากชนิดของเถ้าลอยต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์

รูปที่ 4.37 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 ของเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด เมื่อมีอายุของการแช่สารละลายซัลเฟต 61 สัปดาห์ ซึ่งจากการพิจารณาผลกระทบของชนิดของเถ้าลอยต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ พบว่า ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด มีค่าการสูญเสียน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน อาจเป็นไปได้ว่าอายุของการแช่สารละลายยังน้อย จึงทำให้ไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจน ส่วนรูปที่ 4.38 แสดงภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ในการวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต จากรูปจะเห็นได้ว่า ที่ผิวของมอร์ตาร์ได้เกิดการหลุดล่อนออกซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีกลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น



รูปที่ 4.37 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 61 สัปดาห์



C1



C5



C1-20FA



C1-40FA



C1-30SL



C1-50SL



C1-5LP



C1-10LP



C1-15FA-5LP



C1-10FA-10LP



C1-35FA-5LP



C1-30FA-10LP



C1-25SL-5LP



C1-20SL-10LP



C1-45SL-5LP



C1-40SL-10LP



C1-5SF



C1-10SF

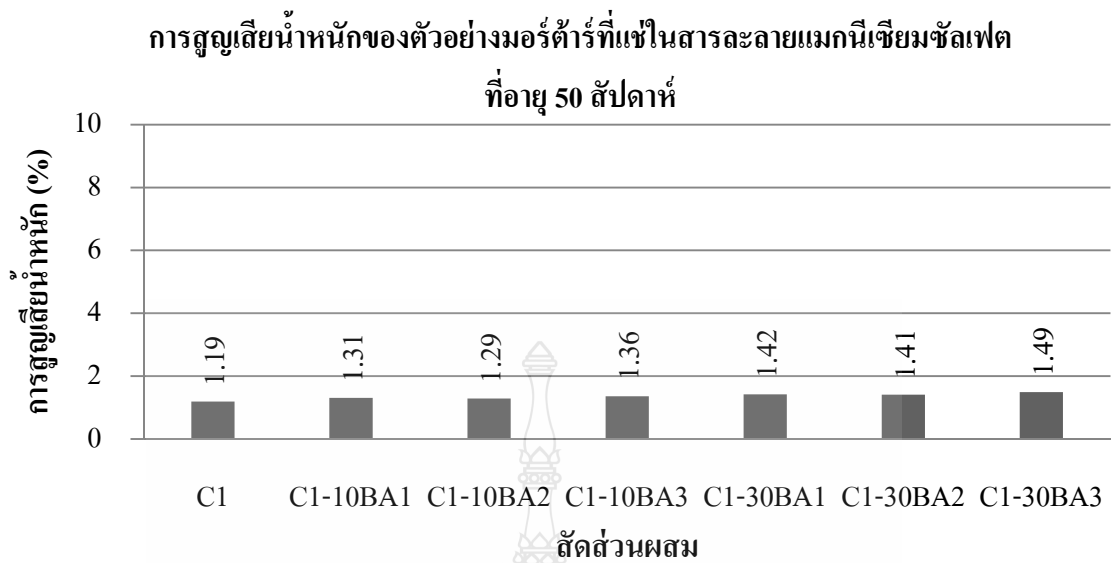


รูปที่ 4.38 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 61 สัปดาห์

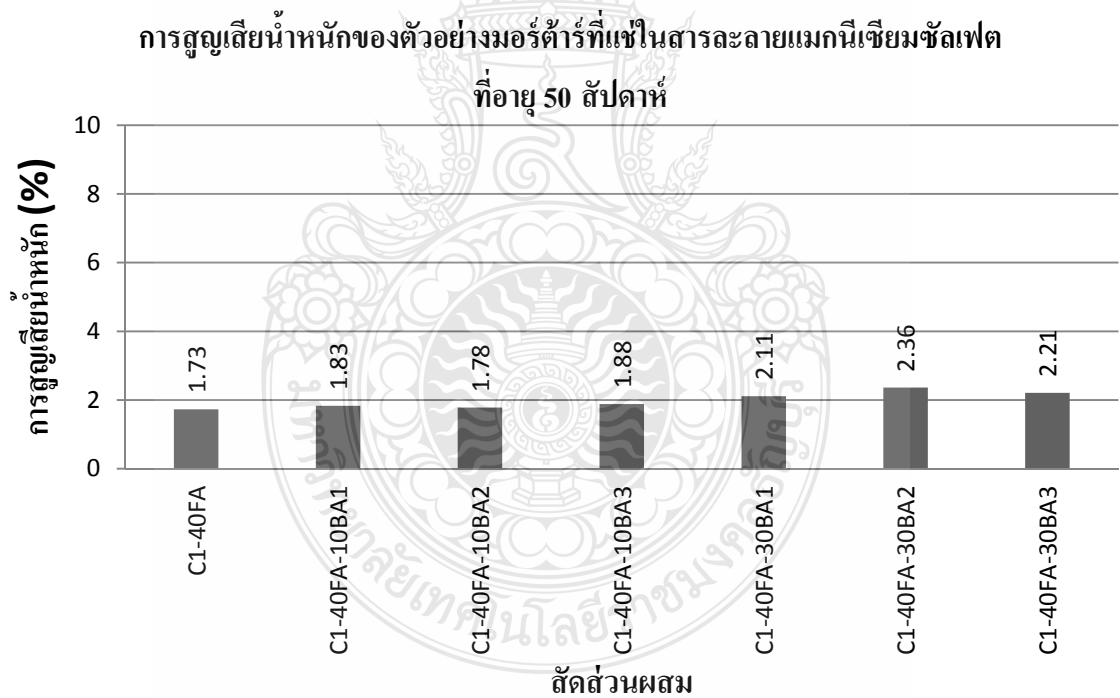
4.2.3 ผลกระทบเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ในมวลรวมละเอียดต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์

จากรูปที่ 4.39 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างเมื่ออายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 50 สัปดาห์ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 มอร์ตาร์ผสมตะกอนเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 มอร์ตาร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ทั้งทรายล้วนและแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา BA1, BA2, และ BA3 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร พบว่า การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกล่าวคือ เมื่อใช้เถ้าก้นเตา BA1, BA2, และ BA3 แทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 มอร์ตาร์ผสมตะกอนเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 และมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ได้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่ากรณีที่ใช้ทรายล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าก้นเตา (ส่วนที่มีความละเอียด) ทำให้ความเป็นด่างในมอร์ตาร์น้อยลง (ลด $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ จึงทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CSH) เปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาในปริมาณที่สูงขึ้น รวมทั้งเถ้าก้นเตามีสภาพเป็นรูพรุนส่งผลให้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ง่ายขึ้น จึงส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้น

ส่วนรูปที่ 4.40 แสดงภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ในการวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต รูปจะเห็นได้ว่า ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ได้เกิดการหลุดร่อนออกซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีกลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



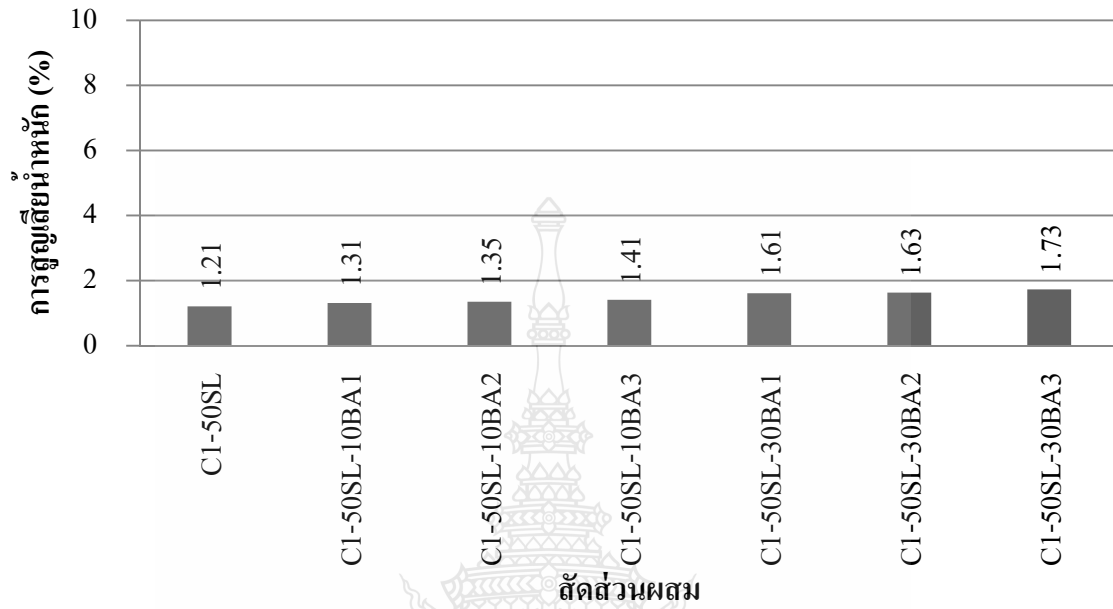
ก) มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน



ข) มอร์ต้าผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 40)

รูปที่ 4.39 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วนและเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ในทรายที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตอายุ 50 สัปดาห์

การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
ที่อายุ 50 สัปดาห์

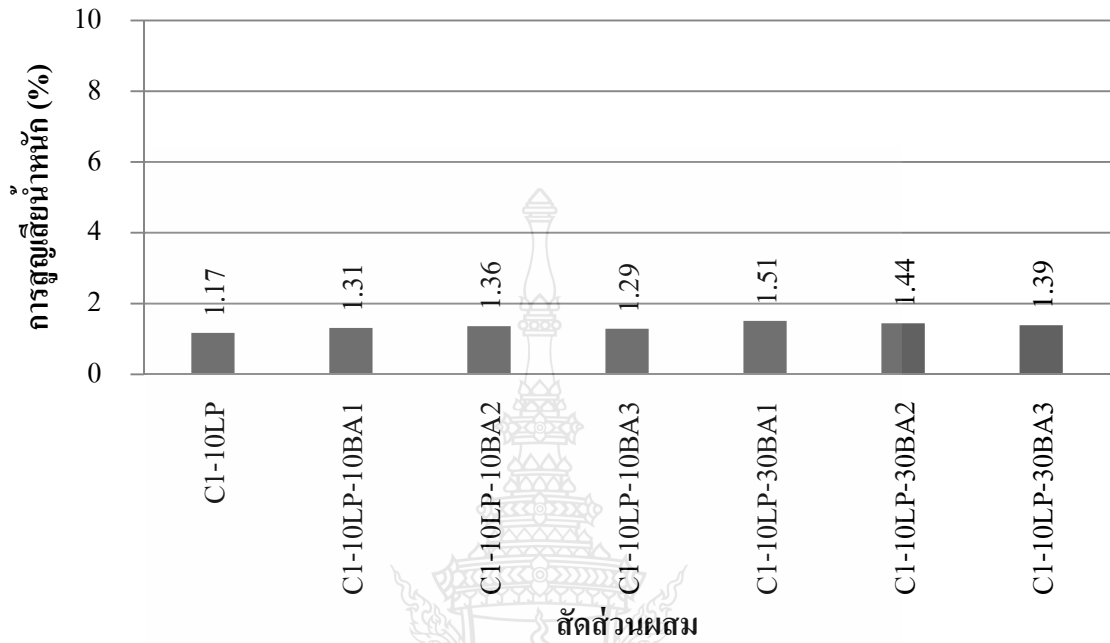


สัดส่วนผสม

ค) มอร์ต้าผสมตะกรันเตากลูงเหล็ก (ร้อยละ 40)



การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
ที่อายุ 50 สัปดาห์



ง) มอร์ต่าผสมผงหินปูน (ร้อยละ 10)

รูปที่ 4.39 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วนและเมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่
ในทรายที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตอายุ 50 สัปดาห์ (ต่อ)



C1



C1-10BA1



C1-10BA2



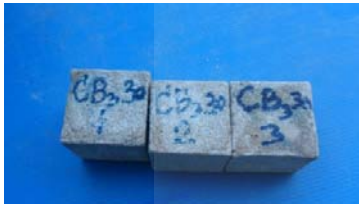
C1-10BA3



C1-30BA1



C1-30BA2



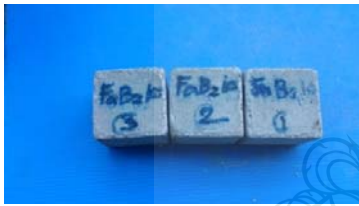
C1-30BA3



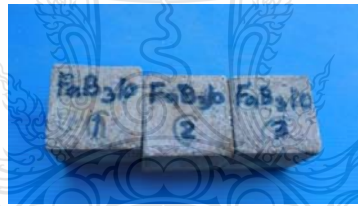
C1-40FA



C1-40FA-10BA1



C1-40FA-10BA2



C1-40FA-10BA3



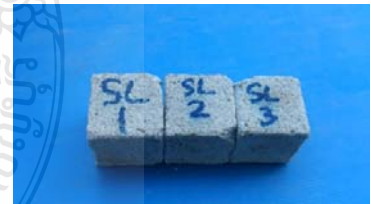
C1-40FA-30BA1



C1-40FA-30BA2



C1-40FA-30BA3



C1-50SL



50SL-10BA1



C1-50SL-10BA2



C1-50SL-10BA3



C1-50SL-30BA1



C1-50SL-30BA2



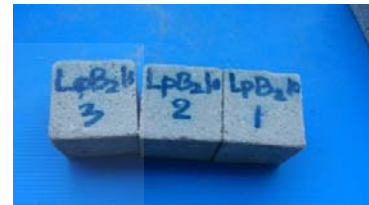
C1-50SL-30BA3



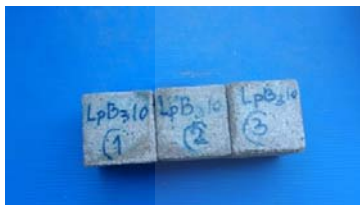
C1-10LP



C1-10LP-10BA1



C1-10LP-10BA2



C1-10LP-10BA3



C1-10LP-30BA1



C1-10LP-30BA2



C1-10LP-30BA3

รูปที่ 4.40 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 50 สัปดาห์

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ในสารละลายซัลเฟต การขยายตัวของมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วน

5.1.2 การขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย GGBS ซิลิกาฟูม และผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์ OPC ส่วน โดยมีค่าใกล้เคียงหรือน้อยกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วน ยกเว้นการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย (ที่มี CaO สูง) และผสม GGBS ทั้งที่ผสม 2 และ 3 วัสดุประสานในปริมาณที่น้อย และการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน 2 วัสดุประสาน จะให้ค่าที่มากกว่าหรือใกล้เคียงกับของมอร์ตาร์ OPC ส่วน

5.1.3 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ (ทั้งที่ใช้ OPC ส่วน และผสมเถ้าลอย GGBS ซิลิกาฟูม และผงหินปูน) ที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ในทรายจะมีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วน ยกเว้นมอร์ตาร์ที่ผสม GGBS ในปริมาณมากที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ในทราย จะให้ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตมากกว่าของมอร์ตาร์ที่ใช้ทรายล้วน

5.1.4 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย GGBS และซิลิกาฟูม มีค่ามากกว่าของมอร์ตาร์ OPC ส่วน ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนทั้ง 2 และ 3 วัสดุประสานมีแนวโน้มน้อยกว่าของมอร์ตาร์ OPC ส่วน

5.1.5 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ในทราย มีค่ามากกว่าของมอร์ตาร์ที่ใช้ทรายล้วน

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา หินปูน มีข้อเสนอแนะดังนี้

5.2.1 ในการศึกษาในครั้งใช้ตัวอย่างเป็นมอร์ตาร์ ดังนั้นควรพิจารณาใช้ตัวอย่างคอนกรีต เพื่อให้ได้ผลใกล้เคียงกับการใช้งานจริงในสภาพแวดล้อมเมื่อเจอกับสารละลายซัลเฟต

5.2.2 ในสภาพแวดล้อมจริงมีสารละลายอื่นที่นอกเหนือจากสารละลายซัลเฟตผสมอยู่ด้วย เช่น คลอไรด์ ดังนั้นจึงควรพิจารณาในกรณีสารละลายซัลเฟตผสมคลอไรด์

5.2.3 ระยะเวลาในการศึกษาควรมากกว่านี้เพื่อที่จะให้เห็นผลที่ชัดเจน

5.2.4 ในการนำไปใช้งานจริงควรศึกษาคุณสมบัติด้านอื่นๆ เพิ่มเติมที่นอกเหนือจากการต้านทานซัลเฟต เช่น กำลั้งอัด การหดตัว การต้านทานคลอไรด์และคาร์บอนเนชั่น เป็นต้น

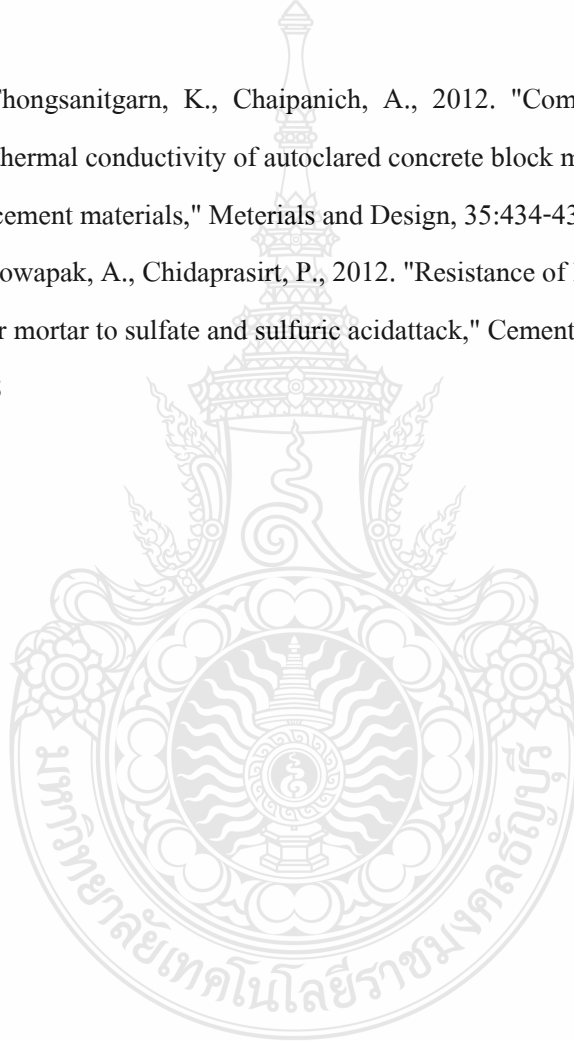


บรรณานุกรม

- [1] Al-Amoudi O.S.B., Maslehuddin M., Saadi, M.M., "Effect of magnesium and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements," ACI Materials Journal 92: 1995, pp.15-24.
- [2] Krammart P. and Tangtermsirikul S., 2002. "Strength Reduction and Expansion of Mortars with Fly Ash," Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand, V.13, No.3 pp. 9-16.
- [3] Krammart P. and Tangtermsirikul S., 2004. "Expansion, Strength Reduction and Weight Loss of Fly Ash Concrete in Sulfate Solution," ASEAN Journal on SCIENCE & TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT, V12.
- [4] American Society for Testing and Material, Annual Book of ASTM Standard, V 04.02, Easton, Md., USA., 1996.
- [5] กระทรวงอุตสาหกรรม, "กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แก้วลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต," มาตรฐาน มอก.2135-2545. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2546, หน้า 3.
- [6] สหลาก หอมวุฒิวงศ์, ดิลก คุรัตน์เวช และ ชัย จตุรพิทักษ์กุล, "การทดสอบและแปรผลการทดสอบต่อคุณสมบัติต่อถ่านหิน," การสัมมนาทางวิชาการเรื่องการนำถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในการคอนกรีต, ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [7] Al-Amoudi, O.S.B., "Mechanisms of Sulfate in Plain and Blended Cement. a Review," Proceeding of the International Seminar, University of Dundee, Scotland, UK., 1999.
- [8] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล 2547. ปณิรมนต์ป่อโซโซลานและคอนกรีต. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตไทย.
- [9] คม บัวคลี และบุญไชย สถิตมั่นในธรรม. 2546. "การผสมคอนกรีตที่ผสมแก้วลอย." กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- [10] ปิตีสานต์ กร้ามาตร, สมนึก ตั้งเต็มศิริกุลม, การต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูน, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3, ชลบุรี, 24-26 ตุลาคม, 2550.

บรรณานุกรม (ต่อ)

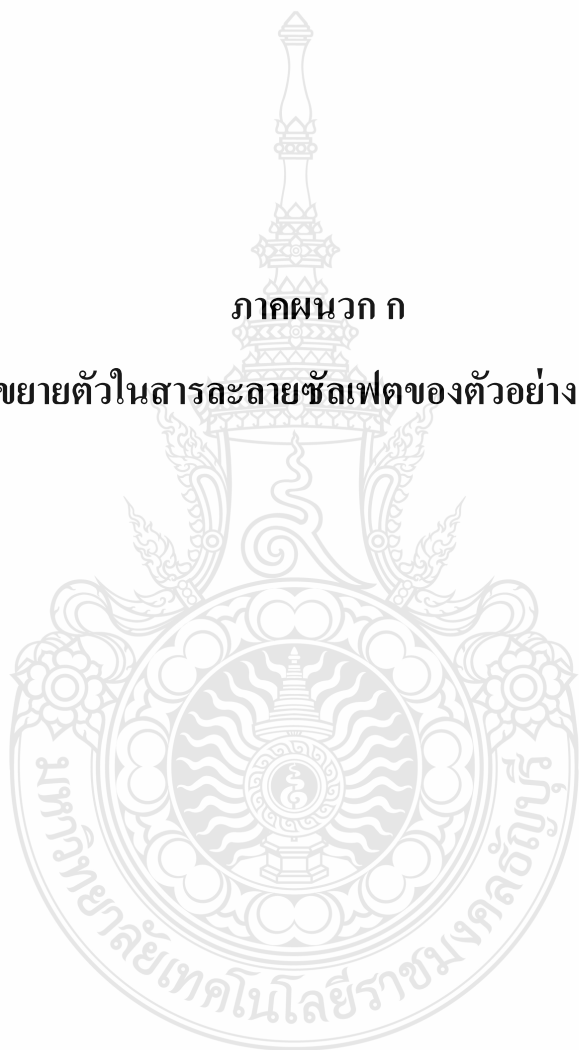
- [11]Sathonsaowapark, A., Chindaprasirt, P., Pimraksa, K., 2009. "Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar," Journal of Harzadous matirials, 168: 44-50
- [12]Chindaprasirt, P., Jatarapitakkul, C., Chalee, W., Ratanasak, U., 2009. "Comparative study on the Characteristics of fly ash and bottom ash geopolymer," Waste Managenent,29: 539-543
- [13]Wongkeo, W., Thongsanitgarn, K., Chaipanich, A., 2012. "Compressive strength, flexural strength and thermal conductivity of autoclared concrete block made using bottom ash as cement replacement materials," Meterials and Design, 35:434-439
- [14]sata, V., Sathonsaowapak, A., Chidaprasirt, P., 2012. "Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfata and sulfuric acidattack," Cement and concrete composites, 34:700-708





ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การขยายตัวในสารละลายซิลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์



ตารางผนวกที่ ก.1 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55

Table shows the expansion of mortar bar (25 x 25 x 285 mm) which immerses in sulfate solution at each variable ages.																
No.	Sample	Sulfate Solution	Expansion of Paste Bars Specimens, %													
			0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	8 weeks	13 weeks	16 weeks	25 weeks	33 weeks	41 weeks	51 week	61 week	69 week	77 week
1	C1	Mg	0.000	0.0045	0.0006	0.0082	0.0066	0.0165	0.0220	0.0450	0.0822	0.1755	0.3225	0.4212	0.4676	0.5218
		Na	0.000	0.0001	0.0001	0.0043	0.0037	0.0087	0.0153	0.0305	0.0566	0.0970	0.1791	0.2831	0.3715	0.4521
2	C5	Mg	0.000	0.0006	-0.0001	0.0085	0.0087	0.0218	0.0282	0.0375	0.0744	0.1218	0.2587	0.5393	0.7565	1.0733
		Na	0.000	0.0024	0.0004	0.0040	0.0073	0.0096	0.0123	0.0189	0.0312	0.0446	0.0550	0.0625	0.0667	0.0759
3	C1-20FA	Mg	0.000	0.0044	0.0080	0.0096	0.0119	0.0200	0.0240	0.0288	0.0389	0.0845	0.1706	0.2038	0.2412	0.2776
		Na	0.000	-0.0026	-0.0046	-0.0010	-0.0012	0.0035	0.0040	0.0054	0.0138	0.0398	0.0659	0.0814	0.1074	0.1204
4	C1-40FA	Mg	0.000	0.0068	0.0054	0.0078	0.0071	0.0085	0.0065	0.0104	0.0233	0.0317	0.0378	0.0439	0.0552	0.0621
		Na	0.000	0.0023	-0.0004	0.0014	0.0017	0.0016	0.0008	0.0020	0.0168	0.0218	0.0446	0.0425	0.0405	0.0432
5	C1-30SL	Mg	0.000	0.0031	0.0040	0.0060	0.0094	0.0239	0.0396	0.0806	0.1451	0.2592	0.4976	0.6460	0.7965	1.2432
		Na	0.000	0.0009	0.0016	0.0033	0.0013	0.0137	0.0150	0.0230	0.0480	0.0862	0.1899	0.3611	0.5706	0.9763
6	C1-50SL	Mg	0.000	0.0075	0.0118	0.0130	0.0167	0.0206	0.0210	0.0319	0.0561	0.1057	0.2516	0.3421	0.4518	0.7060
		Na	0.000	0.0018	-0.0021	0.0010	-0.0008	-0.0010	0.0030	0.0046	0.0216	0.0286	0.0586	0.0632	0.0710	0.0865
7	C1-5LP	Mg	0.000	0.0046	-0.0002	0.0005	0.0018	0.0210	0.0319	0.0387	0.0697	0.1242	0.2007	0.2515	0.3216	0.4518
		Na	0.000	0.0032	0.0058	0.0110	0.0250	0.0306	0.0440	0.0600	0.1060	0.1696	0.2704	0.3711	0.4382	0.5177
8	C1-10LP	Mg	0.000	0.0074	0.0053	0.0080	0.0132	0.0322	0.0427	0.0537	0.0737	0.1037	0.1596	0.1887	0.2211	0.2854
		Na	0.000	0.0042	0.0068	0.0115	0.0240	0.0276	0.0400	0.0460	0.0752	0.1244	0.1859	0.2705	0.3316	0.3839

ตารางผนวกที่ ก.1 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 (ต่อ)

Table shows the expansion of mortar bar (25 x 25 x 285 mm) which immerses in sulfate solution at each variable ages.

No.	Sample	Sulfate Solution	Expansion of Paste Bars Specimens, %													
			0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	8 weeks	13 weeks	16 weeks	25 weeks	33 weeks	41 weeks	51 week	61 week	69 week	77 week
9	C1-15FA-5LP	Mg	0.000	0.0071	0.0046	0.0106	0.0097	0.0149	0.0153	0.0401	0.0994	0.1704	0.3151	0.3848	0.4606	0.6458
		Na	0.000	0.0048	0.0018	0.0083	0.0046	0.0118	0.0191	0.0400	0.0882	0.1498	0.2970	0.4012	0.4706	0.5702
10	C1-10FA-10LP	Mg	0.000	0.0050	0.0066	0.0100	0.0150	0.0275	0.0421	0.0769	0.1237	0.2155	0.3380	0.3950	0.4525	0.5469
		Na	0.000	0.0011	0.0024	0.0053	0.0140	0.0223	0.0345	0.0551	0.1162	0.2028	0.3425	0.4626	0.5359	0.6519
11	C1-35FA-5LP	Mg	0.000	0.0051	0.0078	0.0099	0.0097	0.0110	0.0101	0.0136	0.0276	0.0408	0.0553	0.0733	0.0967	0.2318
		Na	0.000	0.0036	-0.0009	0.0024	-0.0001	0.0030	0.0039	0.0039	0.0168	0.0283	0.0465	0.0469	0.0492	0.0763
12	C1-30FA-10LP	Mg	0.000	0.0030	0.0052	0.0070	0.0110	0.0160	0.0180	0.0200	0.0284	0.0471	0.0832	0.0847	0.1069	0.1569
		Na	0.000	-0.0007	-0.0016	-0.0026	-0.0010	0.0058	0.0078	0.0094	0.0128	0.0250	0.0374	0.0430	0.0457	0.0526
13	C1-25SL-5LP	Mg	0.000	0.0150	0.0120	0.0162	0.0173	0.0241	0.0257	0.0287	0.0582	0.1238	0.2056	0.3612	0.4509	0.6391
		Na	0.000	0.0098	0.0046	0.0023	0.0004	0.0043	0.0065	0.0076	0.0213	0.0387	0.0543	0.0476	0.0476	0.0539
14	C1-20SL-10LP	Mg	0.000	0.0099	0.0118	0.0147	0.0190	0.0481	0.1016	0.2390	0.3857	0.6385	1.0160	1.1944	1.3602	1.7192
		Na	0.000	0.0059	0.0054	0.0064	0.0100	0.0225	0.0360	0.0524	0.1270	0.2654	0.6011	0.8312	-	-
15	C1-45SL-5LP	Mg	0.000	0.0125	0.0097	0.0173	0.0185	0.0296	0.0343	0.0447	0.0678	0.1147	0.2246	0.2960	0.3792	0.5624
		Na	0.000	0.0064	0.0075	0.0102	0.0111	0.0167	0.0170	0.0187	0.0279	0.0494	0.0607	0.0567	0.0688	0.0686
16	C1-40SL-10LP	Mg	0.000	0.0080	0.0112	0.0127	0.0146	0.0182	0.0200	0.0357	0.0768	0.1378	0.2950	0.3716	0.4516	0.6951
		Na	0.000	0.0051	0.0078	0.0092	0.0087	0.0127	0.0125	0.0150	0.0268	0.0371	0.0626	0.0592	0.0630	0.0698

ตารางผนวกที่ ก.1 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 (ต่อ)

Table shows the expansion of mortar bar (25 x 25 x 285 mm) which immerses in sulfate solution at each variable ages.																
No.	Sample	Sulfate Solution	Expansion of Paste Bars Specimens, %													
			0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	8 weeks	13 weeks	16 weeks	25 weeks	33 weeks	41 weeks	51 week	61 week	69 week	77 week
17	C1-5SF	Mg	0.000	0.0020	0.0034	0.0058	0.0054	0.0093	0.0096	0.0175	0.0356	0.0558	0.0782	0.0865	0.1278	0.1935
		Na	0.000	0.0032	0.0054	0.0066	0.0090	0.0111	0.0120	0.0140	0.0212	0.0304	0.0346	0.0363	0.0356	0.0467
18	C1-10SF	Mg	0.000	0.0050	0.0083	0.0090	0.0128	0.0184	0.0230	0.0270	0.0361	0.0563	0.0921	0.1028	0.1196	0.1867
		Na	0.000	0.0037	0.0021	0.0035	0.0045	0.0067	0.0089	0.0099	0.0130	0.0218	0.0226	0.0246	0.0298	0.0356
19	C1-5SF-5LP	Mg	0.000	0.0080	0.0100	0.0150	0.0190	0.0234	0.0240	0.0245	0.0292	0.0501	0.0509	0.0526	0.0567	0.0459
		Na	0.000	0.0008	0.0013	0.0060	0.0072	0.0091	0.0095	0.0105	0.0172	0.0297	0.0481	0.0316	0.0315	0.0399
20	C1-10SF-5LP	Mg	0.000	0.0047	0.0068	0.0144	0.0142	0.0184	0.0186	0.0193	0.0220	0.0331	0.0591	0.0401	0.0454	0.0511
		Na	0.000	0.0012	0.0038	0.0050	0.0078	0.0093	0.0098	0.0110	0.0175	0.0277	0.0311	0.0325	0.0362	0.0327
21	C1-20FB	Mg	0.000	-0.0020	0.0012	0.0016	0.0023	0.0014	0.0027	0.0254	0.1160	0.1713	0.2666	0.4775		
		Na	0.000	0.0012	0.0023	-0.0001	-0.0004	0.0042	0.0065	0.0214	0.0489	0.0658	0.0775	0.1067		
22	C1-20FC	Mg	0.000	-0.0012	0.0025	0.0016	0.0025	0.0037	0.0091	0.0304	0.1207	0.1522	0.2142	0.4157		
		Na	0.000	-0.0020	0.0012	-0.0039	-0.0030	0.0014	0.0044	0.0208	0.0443	0.0725	0.0914	0.1240		
23	C1-20FD	Mg	0.000	0.0012	0.0036	0.0005	-0.0015	0.0025	0.0026	0.0156	0.0405	0.0411	0.0446	0.0960		
		Na	0.000	-0.0062	-0.0040	-0.0026	-0.0022	0.0030	0.0035	0.0244	0.0316	0.0256	0.0308	0.0311		
24	C1-40FB	Mg	0.000	-0.0023	-0.0019	-0.0026	-0.0001	0.0013	0.0064	0.0170	0.0441	0.0510	0.0634	0.1180		
		Na	0.000	-0.0009	-0.0011	-0.0002	0.0005	0.0026	0.0087	0.0168	0.0310	0.0375	0.0392	0.0414		

ตารางผนวกที่ ก.1 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 (ต่อ)

Table shows the expansion of mortar bar (25 x 25 x 285 mm) which immerses in sulfate solution at each variable ages.

No.	Sample	Sulfate Solution	Expansion of Paste Bars Specimens, %													
			0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	8 weeks	13 weeks	16 weeks	25 weeks	33 weeks	41 weeks	51 week	61 week	69 week	77 week
25	C1-40FC	Mg	0.000	-0.0010	-0.0018	-0.0030	-0.0040	-0.0003	0.0043	0.0379	0.1343	0.1947	0.2590	0.3925		
		Na	0.000	0.0016	0.0047	-0.0009	0.0032	0.0064	0.0119	0.0312	0.0657	0.0952	0.1060	0.1142		
26	C1-40FD	Mg	0.000	-0.0023	-0.0032	-0.0046	-0.0032	-0.0027	-0.0018	0.0101	0.0481	0.0373	0.0544	0.1065		
		Na	0.000	-0.0063	-0.0055	-0.0043	-0.0012	0.0003	-0.0005	0.0139	0.0268	0.0239	0.0257	0.0257		
27	C1-15FB-5LP	Mg	0.000	-0.0051	-0.0043	-0.0040	-0.0037	-0.0019	0.0037	0.0416	0.1893	0.2661	0.4472	0.6794		
		Na	0.000	-0.0024	0.0023	0.0026	0.0031	0.0040	0.0056	0.0202	0.0311	0.0464	0.0568	0.0816		
28	C1-15FC-5LP	Mg	0.000	-0.0035	0.0009	0.0011	-0.0008	0.0038	0.0138	0.0239	0.1468	0.2164	0.3011	0.5080		
		Na	0.000	-0.0020	-0.0011	-0.0001	-0.0004	0.0023	0.0102	0.0258	0.0265	0.0196	0.0219	0.0342		
29	C1-15FD-5LP	Mg	0.000	-0.0055	-0.0048	-0.0033	-0.0022	0.0002	0.0090	0.0120	0.0723	0.1037	0.1489	0.2453		
		Na	0.000	-0.0065	-0.0055	-0.0021	-0.0002	0.0008	0.0080	0.0098	0.0129	0.0211	0.0209	0.0232		
30	C1-30FB-10LP	Mg	0.000	-0.0035	-0.0028	-0.0017	-0.0003	0.0057	0.0144	0.0185	0.1077	0.1557	0.2089	0.3242		
		Na	0.000	-0.0045	-0.0014	0.0012	0.0021	0.0042	0.0111	0.0171	0.0219	0.0218	0.0218	0.0307		
31	C1-30FC-10LP	Mg	0.000	-0.0024	0.0027	0.0030	0.0032	0.0090	0.0289	0.0474	0.1861	0.2386	0.3089	0.4517		
		Na	0.000	-0.0028	0.0014	0.0030	0.0064	0.0070	0.0144	0.0169	0.0384	0.0425	0.0598	0.0767		
32	C1-30FD-10LP	Mg	0.000	-0.0010	0.0025	0.0033	0.0054	0.0079	0.0184	0.0214	0.0534	0.0585	0.0960	0.2022		
		Na	0.000	-0.0016	0.0019	0.0050	0.0072	0.0101	0.0159	0.0249	0.0267	0.0305	0.0360	0.0415		

ตารางผนวกที่ ก.2 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

Table shows the expansion of mortar bar (25 x 25 x 285 mm) which immerses in sulfate solution at each variable ages.											
Mix No.	Sample	Sulfate Solution	Expansion of Paste Bars Specimens, %								
			0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	16 weeks	24 weeks	32 weeks	40 weeks	50 weeks
1	C1-10BA1	Mg	0.0000	0.0063	0.0030	0.0014	0.0170	0.0906	0.2408	0.4647	0.6181
		Na	0.0000	0.0071	0.0034	0.0014	0.0182	0.0752	0.2344	0.3641	0.6491
2	C1-30BA1	Mg	0.0000	0.0032	0.0037	0.0023	0.0151	0.0775	0.1979	0.3510	0.4553
		Na	0.0000	0.0030	0.0037	0.0000	0.0140	0.0663	0.1654	0.3304	0.5270
3	C1-40FA-10BA1	Mg	0.0000	0.0001	0.0071	-0.0033	0.0149	0.0196	0.0315	0.0684	0.0781
		Na	0.0000	-0.0030	-0.0004	-0.0050	0.0053	0.0187	0.0208	0.0392	0.0404
4	C1-40FA-30BA1	Mg	0.0000	0.0004	0.0060	-0.0046	0.0115	0.0201	0.0330	0.0523	0.0458
		Na	0.0000	0.0036	0.0049	0.0094	0.0142	0.0199	0.0298	0.0515	0.0485
5	C1-50SL-10BA1	Mg	0.0000	-0.0063	-0.0102	-0.0112	0.0002	0.0147	0.0830	0.3879	0.7449
		Na	0.0000	-0.0054	-0.0098	-0.0042	0.0084	0.0165	0.0388	0.0767	0.1182
6	C1-50SL-30BA1	Mg	0.0000	-0.0139	-0.0232	-0.0158	-0.0026	0.0349	0.0979	0.2914	0.4688
		Na	0.0000	-0.0068	-0.0140	-0.0072	0.0054	0.0230	0.0549	0.1054	0.1316
7	C1-10LP-10BA1	Mg	0.0000	0.0018	-0.0026	0.0012	0.0145	0.0968	0.2219	0.3360	0.4598
		Na	0.0000	0.0760	0.0730	0.0740	0.1212	0.1832	0.2742	0.4273	0.7646
8	C1-10LP-30BA1	Mg	0.0000	0.0032	0.0071	0.0020	0.0070	0.0984	0.2173	0.3669	0.4871
		Na	0.0000	0.0351	0.0468	0.0709	0.1035	0.1565	0.1884	0.2730	0.6002

ตารางผนวกที่ ก.2 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 (ต่อ)

Table shows the expansion of mortar bar (25 x 25 x 285 mm) which immerses in sulfate solution at each variable ages.											
Mix No.	Sample	Sulfate Solution	Expansion of Paste Bars Specimens, %								
			0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	16 weeks	24 weeks	32 weeks	40 weeks	50 weeks
9	C1-10BA2	Mg	0.0000	-0.0367	-0.0395	-0.0305	-0.0253	0.0538	0.2670	0.4919	0.6311
		Na	0.0000	-0.0302	-0.0312	-0.0263	-0.0163	0.0570	0.1604	0.2975	0.4325
10	C1-30BA2	Mg	0.0000	-0.0292	-0.0214	-0.0178	-0.0119	0.0588	0.1573	0.2822	0.3784
		Na	0.0000	-0.0118	-0.0211	-0.0198	-0.0067	0.0361	0.1272	0.2272	0.3396
11	C1-40FA-10BA2	Mg	0.0000	-0.0305	-0.0263	-0.0218	-0.0267	-0.0025	0.0163	0.0554	0.0905
		Na	0.0000	-0.0256	-0.0282	-0.0275	-0.0244	-0.0125	-0.0102	-0.0047	0.0026
12	C1-40FA-30BA2	Mg	0.0000	-0.0310	-0.0274	-0.0207	-0.0283	-0.0021	0.0186	0.0278	0.0326
		Na	0.0000	-0.0159	-0.0216	-0.0186	-0.0158	-0.0083	0.0018	0.0090	0.0153
13	C1-50SL-10BA2	Mg	0.0000	0.0195	0.0133	0.0205	0.0166	0.0551	0.1258	0.4049	0.7062
		Na	0.0000	0.0081	-0.0004	0.0051	0.0061	0.0138	0.0304	0.0616	0.0747
14	C1-50SL-30BA2	Mg	0.0000	-0.0072	-0.0039	0.0051	-0.0047	0.0284	0.0628	0.1433	0.2414
		Na	0.0000	0.0037	-0.0058	-0.0021	0.0026	0.0072	0.0235	0.0326	0.0395
15	C1-10LP-10BA2	Mg	0.0000	0.0026	0.0076	0.0115	0.0154	0.1456	0.3335	0.5481	0.6735
		Na	0.0000	0.0042	0.0021	0.0055	0.0204	0.1475	0.2836	0.3516	0.4847
16	C1-10LP-30BA2	Mg	0.0000	-0.0042	0.0022	0.0000	0.0032	0.0738	0.1673	0.2751	0.3488
		Na	0.0000	0.0056	0.0041	0.0071	-0.0046	0.0575	0.1208	0.1987	0.2808

ตารางผนวกที่ ก.2 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้ากั้นเตาในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 (ต่อ)

Table shows the expansion of mortar bar (25 x 25 x 285 mm) which immerses in sulfate solution at each variable ages.											
Mix No.	Sample	Sulfate Solution	Expansion of Paste Bars Specimens, %								
			0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	16 weeks	24 weeks	32 weeks	40 weeks	50 weeks
17	C1-10BA3	Mg	0.0000	0.0019	-0.0042	0.0014	0.0101	0.0664	0.2255	0.4093	0.5316
		Na	0.0000	0.0053	-0.0006	0.0040	0.0109	0.0354	0.2033	0.3849	0.5084
18	C1-30BA3	Mg	0.0000	0.0033	-0.0011	0.0028	0.0130	0.0526	0.1575	0.2737	0.3575
		Na	0.0000	0.0042	0.0000	0.0008	0.0132	0.0352	0.0821	0.1774	0.2663
19	C1-40FA-10BA3	Mg	0.0000	0.0044	0.0005	0.0065	0.0068	0.0214	0.0351	0.0598	0.0651
		Na	0.0000	0.0039	0.0011	0.0006	0.0070	0.0002	0.0194	0.0276	0.0351
20	C1-40FA-30BA3	Mg	0.0000	-0.0025	-0.0050	0.0006	0.0042	0.0160	0.0261	0.0347	0.0412
		Na	0.0000	0.0104	0.0034	0.0037	0.0082	-0.0001	0.0251	0.0309	0.0370
21	C1-50SL-10BA3	Mg	0.0000	-0.0032	0.0049	0.0172	0.0335	0.0991	0.1833	0.3833	0.6472
		Na	0.0000	0.0009	-0.0060	-0.0044	0.0018	-0.0028	0.0261	0.0432	0.0714
22	C1-50SL-30BA3	Mg	0.0000	-0.0008	-0.0023	0.0083	0.0076	0.0327	0.0611	0.1249	0.1927
		Na	0.0000	0.0088	0.0007	0.0063	0.0090	0.0094	0.0288	0.0379	0.0465
23	C1-10LP-10BA3	Mg	0.0000	0.0053	-0.0008	0.0053	0.0095	0.0658	0.2055	0.3850	0.5116
		Na	0.0000	0.0077	0.0025	0.0077	0.0161	0.0525	0.1661	0.3289	0.4333
24	C1-10LP-30BA3	Mg	0.0000	0.0030	-0.0007	0.0042	0.0075	0.0693	0.1833	0.3240	0.4225
		Na	0.0000	0.0104	0.0070	0.0121	0.0242	0.0623	0.1919	0.3561	0.4821

ตารางผนวกที่ ก.2 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้ากั้นเตาในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 (ต่อ)

Table shows the expansion of mortar bar (25 x 25 x 285 mm) which immerses in sulfate solution at each variable ages.											
Mix No.	Sample	Sulfate Solution	Expansion of Paste Bars Specimens, %								
			0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	16 weeks	24 weeks	32 weeks	40 weeks	50 weeks
25	C1-40FA	Mg	0.0000	-0.0030	-0.0137	-0.0104	-0.0032	0.0347	0.0826	0.2591	0.3947
		Na	0.0000	0.0094	0.0013	0.0034	0.0061	0.0265	0.0450	0.0551	0.0788
26	C1-50SL	Mg	0.0000	0.0054	-0.0090	-0.0013	0.0068	0.0971	0.4046	1.2554	1.9951
		Na	0.0000	-0.0044	-0.0104	-0.0054	0.0019	0.0196	0.0689	0.1389	0.3189
27	C1-10LP	Mg	0.0000	0.0012	-0.0069	-0.0009	0.0117	0.1298	0.3083	0.5437	0.9132
		Na	0.0000	0.0082	0.0261	0.0510	0.1608	0.2420	0.4012	0.6146	0.9165
28	C1	Mg	0.0000	-0.0048	-0.0189	-0.0113	0.0106	0.0912	0.2869	0.6209	1.0986
		Na	0.0000	0.0413	0.0771	0.1030	0.2089	0.3248	0.5158	0.6772	0.7439

ภาคผนวก ข
การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์



ตารางผนวกที่ ข.1 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 61 สัปดาห์ (427 วัน)

Table shows the weight of mortar Loss cube (5 x 5 x 5 mm) which immerses in sulfate solution at each variable ages.													
No.	Sample	Weight loss of cube Specimens, %											
		0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	8 weeks	13 weeks	16 weeks	25 weeks	33 weeks	41 weeks	51 weeks	61 weeks
1	C1	0	0.58	0.95	0.78	0.96	1.66	2.01	1.62	1.74	2.17	1.78	1.90
2	C5	0	-0.21	0.45	0.38	0.57	1.61	2.13	1.86	2.17	2.88	2.73	2.89
3	C1-20FA(1)	0	0.50	1.06	1.13	1.50	1.41	1.78	1.57	1.89	2.10	2.07	2.19
4	C1-40FA(1)	0	-0.19	0.43	0.57	0.99	1.48	2.05	1.73	2.20	2.61	3.10	3.26
5	C1-30SL	0	0.08	0.67	0.55	0.95	1.02	1.39	0.91	1.30	1.57	1.57	1.83
6	C1-50SL	0	0.07	0.63	-0.10	1.02	1.34	1.42	0.71	1.35	1.57	1.30	1.34
7	C1-5LP	0	0.14	0.80	0.73	1.08	1.55	1.75	1.22	1.62	1.98	1.57	1.60
8	C1-10LP	0	0.04	0.60	0.53	0.93	0.89	1.49	1.12	1.51	1.72	1.38	1.54
9	C1-15FA(1)-5LP	0	0.02	0.56	0.48	0.81	1.24	1.85	1.49	1.90	2.14	2.54	2.73
10	C1-10FA(1)-10LP	0	0.08	0.72	0.51	0.95	1.17	1.59	1.09	1.54	1.79	1.73	1.93
11	C1-35FA(1)-5LP	0	0.09	0.80	0.78	1.18	1.43	1.90	1.58	2.13	2.02	2.34	2.45
12	C1-30FA(1)-10LP	0	-0.03	0.41	0.46	0.86	0.90	1.36	1.01	1.50	1.50	1.48	1.61
13	C1-25SL-5LP	0	0.16	0.60	0.56	0.98	1.81	2.22	2.09	2.32	2.57	2.63	2.76
14	C1-20SL-10LP	0	0.25	0.82	0.77	1.15	1.82	2.18	1.81	2.13	2.26	2.21	2.36
15	C1-45SL-5LP	0	0.06	0.64	0.71	1.13	1.61	2.39	2.16	2.59	2.80	3.81	3.53
16	C1-40SL-10LP	0	0.00	0.73	0.67	1.05	1.35	1.93	1.60	2.11	2.51	2.72	2.89

ตารางผนวกที่ ข.1 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 61 สัปดาห์ (427 วัน) (ต่อ)

Table shows the weight of mortar Loss cube (5 x 5 x 5 mm) which immerses in sulfate solution at each variable ages.													
No.	Sample	Weight loss of cube Specimens, %											
		0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	8 weeks	13 weeks	16 weeks	25 weeks	33 weeks	41 weeks	51 weeks	61 weeks
17	C1-5SF	0	0.37	1.07	1.10	1.42	1.64	1.74	1.32	1.52	2.14	2.08	2.15
18	C1-10SF	0	0.38	0.94	0.90	1.29	1.50	1.53	1.31	1.54	1.94	1.80	1.95
19	C1-5SF-5LP	0	-0.24	-0.07	-0.37	0.27	0.40	0.75	0.51	0.62	1.13	1.13	1.19
20	C1-10SF-5LP	0	-0.21	-0.06	-0.15	0.28	0.07	0.25	-0.04	0.33	0.57	0.28	0.50
21	C1-20FA(2)	0	0.55	0.62	1.26	1.33	1.31	1.42	1.80	2.44	2.10	1.76	2.79
22	C1-20FA(3)	0	0.62	0.48	1.23	1.32	1.28	1.38	1.59	1.07	1.15	1.23	2.71
23	C1-20FA(4)	0	0.56	0.42	1.02	1.07	1.07	1.19	1.29	0.92	1.20	1.47	2.94
24	C1-40FA(2)	0	0.26	0.27	0.97	1.12	1.09	1.38	1.54	1.35	1.52	1.68	3.09
25	C1-40FA(3)	0	0.64	0.43	0.79	0.54	1.06	1.26	1.39	0.94	1.09	1.25	3.02
26	C1-40FA(4)	0	0.55	0.40	0.62	0.96	0.99	1.08	1.29	0.79	0.83	0.86	3.16
27	C1-15FA-5LP(2)	0	0.53	0.78	1.10	1.21	1.23	1.25	1.36	1.07	0.65	0.23	2.25
28	C1-15FA-5LP(3)	0	-0.14	0.07	0.19	0.11	0.47	0.21	0.16	-0.17	0.09	0.34	1.81
29	C1-15FA-5LP(4)	0	-0.28	-0.03	0.05	0.02	0.37	0.11	0.28	0.14	0.42	0.70	2.29
30	C1-30FA-10LP(2)	0	-0.22	-0.03	0.07	0.00	0.40	0.12	0.34	-0.09	0.03	0.15	1.19
31	C1-30FA-10LP(3)	0	-0.37	-0.21	-0.08	-0.24	0.15	-0.13	-0.23	-0.92	-0.74	-0.56	0.51
32	C1-30FA-10LP(4)	0	-0.32	-0.07	0.05	0.00	0.27	-0.04	0.07	-0.33	-0.24	-0.15	1.11

ตารางผนวกที่ ข.2 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 50 สัปดาห์ (350 วัน)

No.	Sample	Weight loss of cube Specimens, %								
		0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	16 weeks	24 weeks	32 weeks	40 weeks	50 weeks
1	C1-10BA1	0.00	-0.27	-0.40	-0.69	-1.16	-0.97	-0.58	1.03	1.31
2	C1-30BA1	0.00	-0.13	-0.26	-0.39	-0.86	-0.66	-0.33	0.54	1.42
3	C1-40FA-10BA1	0.00	-0.14	-0.32	-0.50	-0.95	-0.76	-0.42	1.49	1.83
4	C1-40FA-30BA1	0.00	-0.17	-0.39	-0.41	-0.90	-0.67	-0.23	1.08	2.11
5	C1-50SL-10BA1	0.00	-0.05	-0.27	-0.37	-0.79	-0.57	-0.16	-1.01	1.31
6	C1-50SL-30BA1	0.00	-0.18	-0.29	-0.42	-0.90	-0.76	-0.45	0.73	1.61
7	C1-10LP-10BA1	0.00	-0.12	-0.39	-0.36	-0.77	-0.62	-0.25	0.82	1.31
8	C1-10LP-30BA1	0.00	-0.24	-0.39	-0.54	-1.06	-0.90	-0.37	0.93	1.29
9	C1-10BA2	0.00	-0.19	-0.40	-0.44	-0.80	-0.64	-0.25	0.64	1.29
10	C1-30BA2	0.00	-0.12	-0.20	-0.33	-0.81	-0.53	-0.05	1.09	1.71
11	C1-40FA-10BA2	0.00	-0.16	-0.43	-0.36	-0.84	-0.66	-0.18	1.29	1.78
12	C1-40FA-30BA2	0.00	-0.05	-0.18	-0.20	-0.65	-0.48	-0.08	1.51	2.36
13	C1-50SL-10BA2	0.00	-0.19	-0.32	-0.40	-0.79	-0.55	-0.22	-1.89	1.35
14	C1-50SL-30BA2	0.00	-0.17	-0.38	-0.46	-0.97	-0.76	-0.32	-1.19	1.63
15	C1-10LP-10BA2	0.00	-0.21	-0.39	-0.49	-0.86	-0.71	-0.33	0.03	1.36
16	C1-10LP-30BA2	0.00	-0.19	-0.43	-0.45	-0.90	-0.72	-0.23	0.48	1.44

ตารางผนวกที่ ข.2 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 50 สัปดาห์ (350 วัน) (ต่อ)

Table shows the weight of mortar Loss cube (5 x 5 x 5 mm) which immerses in sulfate solution at each variable ages.

No.	Sample	Weight loss of cube Specimens, %								
		0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	16 weeks	24 weeks	32 weeks	40 weeks	50 weeks
17	C1-10BA3	0.00	-0.24	-0.37	-0.52	-0.95	-0.83	-0.42	1.03	1.36
18	C1-30BA3	0.00	-0.14	-0.40	-0.38	-0.84	-0.68	-0.19	1.37	1.49
19	C1-40FA-10BA3	0.00	-0.16	-0.31	-0.49	-0.98	-0.90	-0.43	1.51	1.88
20	C1-40FA-30BA3	0.00	-0.12	-0.23	-0.28	-0.65	-0.62	-0.29	2.18	2.36
21	C1-50SL-10BA3	0.00	-0.19	-0.29	-0.42	-0.75	-0.59	-0.25	-1.17	1.31
22	C1-50SL-30BA3	0.00	-0.09	-0.23	-0.47	-0.90	-0.67	-0.19	1.06	1.73
23	C1-10LP-10BA3	0.00	-0.22	-0.48	-0.45	-0.85	-0.64	-0.19	1.27	1.29
24	C1-10LP-30BA3	0.00	-0.26	-0.50	-0.54	-0.89	-0.66	-0.17	1.70	1.39
25	C1-40FA	0.00	-0.28	-0.55	-0.52	-0.89	-0.69	-0.38	1.33	1.73
26	C1-50SL	0.00	-0.09	-0.25	-0.34	-0.71	-0.51	-0.14	-0.75	1.21
27	C1-10LP	0.00	-0.20	-0.25	-0.52	-0.84	-0.73	-0.35	0.72	1.17
28	C1	0.00	-0.28	-0.49	-0.44	-0.87	-0.69	-0.29	0.77	1.19



ภาคผนวก ค
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



การประชุมวิชาการ

วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20

The 20th National Convention on Civil Engineering



วิศวกรรมโยธากับการก้าวเข้าสู่ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน

Civil Engineering Moving Towards
ASEAN Economic Community

วันที่ 8-10 กรกฎาคม 2558 ณ โรงแรมเดอะชานน์ พัทยาเหนือ จ.ชลบุรี



Tempapra : MAT-5

15.00 – 16.45 น.

ประธานภาค : ศ.ดร. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล

009-MAT	PAVING BLOCK MIXED WITH RECYCLED FOAM FOOD CONTAINERS พรมทรายผสม บุงูราศรี, จรูญ เจริญเนตรกุล และ ภาณุวัฒน์ กาลสงค์
045-MAT	CONCRETE BLOCK MIXED WITH PALM SHELL FOR THERMAL INSULATION จรูญ เจริญเนตรกุล, ถาวร เกื้อสกุล และ พรมทราย บุงูราศรี
89-MAT	THE EFFECT OF CONCRETE MIXED WITH FLY ASH ON SURFACE OF CONCRETE ชจรศักดิ์ ไชยวงษ์ และ คมสัน มาลีสี
213-MAT	USE OF CALCIUM CARBIDE RESIDUE MIXED WITH FLY ASH AND BAGASSE ASH AS BINDER TO PRODUCE CONCRETE BRICK ณัฐพงศ์ มกระธัช, วศิน อวีพงษ์ประทีป, วรากร น้อยอง และ นัฐพล เบลูจรูญ
225-MAT	STUDY PRODUCTION OF UNFIRED BUILDING BRICKS ณัฐพงศ์ จันทร์เพชร
483-MAT	A DEVELOPMENT OF ADOBE BRICK MADE FROM LOES ประยูร พรมหลวงศรี และ จักรพันธ์ วงษ์พา
566-MAT	MECHANICAL PROPERTIES OF STANDARD INTERLOCKING BLOCK IN THAILAND AND HYDRAFORM INTERLOCKING BLOCK สุบรรณ ตาคำวัน

Flavio : MAT-6

16.55 – 18.10 น.

ประธานภาค : รศ.ดร. วันชัย สดตะ

010-MAT	AN OPTIMIZATION MODEL FOR A PREDICTION MIX PROPORTION OF CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE ณัฐวุฒิ แห่งศิริธรรม, สุวัฒน์ ถึงศรีพงษ์ และ ชลิตา อู่ตะเภา
365-MAT	MARGINAL PAVEMENT MATERIALS STABILIZED WITH PORTLAND CEMENT AND CHEMICAL POLYMER SOLUTION Sirichai Chareonwutirap, Kittichai Chareonwutirap, Danai Singhasanee, Chanyuth Kongkerd and Itthikom Phummiphon
401-MAT	PREDICTION OF FREE CHLORIDE AND TOTAL CHLORIDE PENETRATION PROFILES IN CONCRETE CONTAINING FLY ASH อัญชญา กิจจานนท์, สุเชิษฐ์ จันทร์ และ ทวีชัย สำราญวานิช
437-MAT	PREDICTION OF THE VOID OF AGGREGATES BY N-D QUADRATIC FUNCTIONS ธีรพงษ์ ลีสอนกุล และ วินัย อายพรประเสริฐ
534-MAT	BASIC INFORMATION FOR ADOBE HOUSE CONSTRUCTION สุรพงษ์ ตารวม
547-MAT	FINDING THE APPROPRIATE CEMENT RATIO TO MAKE INTERLOCKING BLOCK BY USING UNIFIED SOIL PROPERTIES อิทธิพงษ์ พันอินกุล, นท แสงเทียน, ธนกร ทวีวุฒิ, วิวัฒน์ พิวทัศน์านนท์ และ เกรียงศักดิ์ แก้วกลชัย

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

รศ.ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.วิทิต ปานสุข	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ศรีเลิศ โชติพันธ์รัตน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร.เบญจพร สุวรรณศิลป์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.ธีรพงศ์ เสนอจันทร์ฉวีไชย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.อักรวัชร เต๋นวาริ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.ธัญวัฒน์ โพธิ์ศิริ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.ทักษิณ เทพชาติรี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร.พิชชา จงอวิวัฒน์สกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.วิสุทธิ์ ช่อวิเชียร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.วีระศักดิ์ ลิขิตเรืองศิลป์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.สุเชษฐ ลิขิตเลอสรวง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ธเนศ ศรีศิริ ไรจนาร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.จิตติชัย รุ่งนกกนกนาถ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.เกษม ขูจารุกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.ศักดิ์สิทธิ์ เฉลิมพงษ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.นพดล จอกแก้ว	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.วัชร เพ็ชรสุภาพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.จรูญ รุ่งอมรัตน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.รัฐวุฒิ ฐิ์แทนคุณ	บริษัท ทีม คอนซัลติ้ง เอนจิเนียริ่ง แอนด์ แมเนจเม้นท์ จำกัด
ดร.ชนะ บุญยสิริกุล	บริษัท ผลิตไฟฟ้าราชบุรีโฮลดิ้ง จำกัด (มหาชน)
ผศ.ดร.นันทวัฒน์ ขมหวาน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ดร.วิษุวัตต์ เต็มสมบัติ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ดร.จิระกานต์ ศิริวิษณุไมตรี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ดร.สมชาย คอนเจดีย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ดร.ปนัดดา กสิกิจวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ผศ.ดร.วัจน์วงศ์ กัทธิพะละ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ สกลนคร
ผศ.ต่อศักดิ์ ประเสริฐสังข์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ สกลนคร
อ.ฐิตาภรณ์ พ่อนุศรี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ สกลนคร

ผศ.ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ดร.ธิดารัตน์ จิระวัฒนาสมกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.ดร.ดิบุญ เมฆากุลชาติ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ผศ.ดร.ปิยนุช เวทย์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ผศ.ดร.สุนิรัตน์ กุศลาศัย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.ดร.ก่อโชค จันทร์วางนุร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ผศ.ดร.อภินิติ โชติสังกาศ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ดร.สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ดร.สุริยน เปรมปรำโรมาทย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ผศ.ดร.อดิษฐ์ พรพรหมินทร์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ดร.พรรณพิมพ์ พุทธรักษา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.ดร.สุธาริน สถาปัตตานนท์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ผศ.ดร.วีระเกษตร สวนผกา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ผศ.ดร.เหมื่อนมาศ วิเชียรสินธุ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.ดร.ชวเลข วณิชเวทิน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.ดร.วัชรินทร์ วิทยกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.วันชัย สะตะ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.วินัย ศรีอำพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.กิตติเวช ขันดัยวิชัย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร.ธนากร เมธาธรรม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.พงศกร พรรณรัตน์ศิลป์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.ธเนศ เสถียรนาม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.พนกฤษณ คลังบุญครอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.วิชุดา เสถียรนาม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.ลัดดา ตันวานิชกุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.วัชรินทร์ กาสลัก	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.คลฤดี หอมดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.พุทธิพล คำรงค์ชัย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร.ธนพร สุปรีย์ศิลป์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.ธวัชชัย ตันชัยสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ดร.เกรียงไกร อรุโณทยานันท์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ดร.ปรีดา พิษยาพันธ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ดร.อรธดิวิทย์ อูปโยคิน	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.ปุ่น เทียงบูรณะธรรม	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ชูโชค आयพงศ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.อุมา สีนุญเรื่อง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ธีระ ลากิศขางกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.วีระชาติ ตั้งจิรภัทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ทวิช พูลเงิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ชูชัย สุจิรวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.วรรษ ก้องกิงกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.นงลักษณ์ บุญรัตน์กิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ทรงเกียรติ ภัทรปัทมาวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ธิดารัตน์ บุญศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.ชัยยุทธ ชินณะราศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.พิชญ์ สุธีรวรรณา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สันติ เจริญพรพัฒนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.วิโรจน์ ศรีสุรภานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.มาโนช สรรพกิจทิพากร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.ฉัฐพงศ์ มกระรัช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.กิตติภูมิ รอดสิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ขวัญเนตร สมบัติสมภพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.พิทยา แจ่มสว่าง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.สุรัตน์ ศรีจันทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.ฉพล อยู่บรรพต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.กীরติภานต์ พิริยะกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ชัยศาสตร์ สกุลศักดิ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.กวิน ตันติเสวี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.วรรณวิทย์ เต็มทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ศักดิ์ดา กตเวทวารักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ชัยรัตน์ ธีระวัฒนสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รศ.ดร.วีรยา ฉิมอ้อย	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อ.ภักพงศ์ หอมเนียม	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.กำพล ทรัพย์สมบูรณ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.ศิริชัย ตันรัตนวงศ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.ทวีชัย สำราญวานิช	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.ธรรมบุญ รัศมีมาสมือง	มหาวิทยาลัยบูรพา
ดร.เพชรรัตน์ ลิ้มสุปรีyaratน์	มหาวิทยาลัยบูรพา
ดร.วรรณวรางค์ รัตนานิกม	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.สยาม อิ่มศิริ	มหาวิทยาลัยบูรพา
ดร.สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวัชร	มหาวิทยาลัยบูรพา
ดร.ปิไล โรจน์วรรณสินธุ์	มหาวิทยาลัยบูรพา
ร.อ.ผศ.ดร.สราวุธ ลักษณะโต	มหาวิทยาลัยบูรพา
ดร.จิตติมา วงศ์อินดา	มหาวิทยาลัยบูรพา
ดร.พัชรพงษ์ อาสนจินดา	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุกาภ	มหาวิทยาลัยพะเยา
ผศ.ดร.สมบูรณ์ เชื้องฉิน	มหาวิทยาลัยพะเยา
ผศ.ดร.กริสน์ ชัยมูล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร.สมชาย ปฐมศิริ	มหาวิทยาลัยมหิดล
ดร.วศพร เตชะพีรพานิช	มหาวิทยาลัยมหิดล
ดร.ณัฐวัฒน์ จุฑารัตน์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผศ.ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ดร.วิชัยรัตน์ แก้วเจือ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.สุชาติ ลิ้มกัตถัญญ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ดร.ปรเมศวร์ เหลือเทพ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ดร.จุกลพัศ เจนจิวัฒนกุล	มหาวิทยาลัยสยาม
ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.ดร.สถาพร โภคา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร.สิทธา เจนศิริศักดิ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
น.อ.รศ.ดร.ธนากร พิระพันธ์	รร นายเรืออากาศ
ผศ.ดร.ธนาคล คงสมบูรณ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.แหลมทอง เหล่าคงถาวร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.จักรพงษ์ พงษ์เที่ยง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รศ.ดร. โชติชัย เจริญงาม

สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

ดร.สุเมธ อังกิตติกุล

สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย

หมายเหตุ: เรียงลำดับตามชื่อสถาบันการศึกษา หน่วยงานราชการ และหน่วยงานเอกชน (ก-ฮ)





ผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต
Effect of Binder Types on Expansion of Mortar in Sodium Sulfate Solution

อภิชา หนูพันธ์^{1,*} นฤชาติ ชูเมือง² ราพีง ชัยหล้าเจริญ³ และ ปิติศานต์ กรัณมาศ⁴

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสาน (เถ้าลอย จำนวน 4 ชนิด ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูน) ต่อการขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ผลการศึกษาพบว่า ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น การขยายตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 นั้น มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ในขณะที่การขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ยกเว้นเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนอย่างเดียว และแทนที่ด้วยเถ้าลอยหรือตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่น้อยๆ ไม่ว่าจะแทนอย่างเดี่ยวและ/หรือร่วมกับผงหินปูน จะให้การขยายตัวมากกว่าหรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ส่วนเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูง มีแนวโน้มให้การขยายตัวของมอร์ตาร์มากกว่าเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO ต่ำ

คำสำคัญ: มอร์ตาร์, วัสดุประสาน, การขยายตัว, สารละลายโซเดียมซัลเฟต

Abstract

This research aims to study the effect of binder types (fly ash, ground granulated blast-furnace slag, silica fume and limestone powder) on expansion of mortar in sodium sulfate solution. The study found that expansion of mortar portland cement type 5 was lower than that of portland cement type 1

* Corresponding author. (อภิชา หนูพันธ์)

E-mail address: x_kingdom@hotmail.com

(OPC) specimens. While expansion of mortar with fly ash, ground granulated blast-furnace slag, silica fume and limestone powder was less than that of OPC specimens. Except mortar with limestone powder only and with fly ash having high CaO content or ground granulated blast-furnace slag in small amounts whether replace only both limestone powder was slightly more than OPC specimens. Finally the expansion of mortar with and/or had more expansion than mortar with low CaO content.

Keywords: Mortar, Binder material, Expansion, Sodium sulfate solution

1. คำนำ

เนื่องจากปัญหาสภาวะโลกร้อนและกระแสการอนุรักษ์พลังงานรวมถึงสภาวะการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจปัจจุบัน ทำให้มีการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น หากพิจารณาประโยชน์จากการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์โดยเฉพาะกรณีวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิเช่น เถ้าลอย (Fly Ash) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากถ่านหินในโรงผลิตกระแสไฟฟ้า ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground Granulated Blast-furnace slag) ซึ่งเกิดจากกระบวนการถลุงเหล็กซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิตซิลิกอนเมทัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์ และผงหินปูน (Limestone Powder) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ ย่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนการผลิต

และพัฒนาคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น รวมทั้งสามารถแก้ปัญหาการกัดกร่อนและช่วยประหยัดพลังงาน

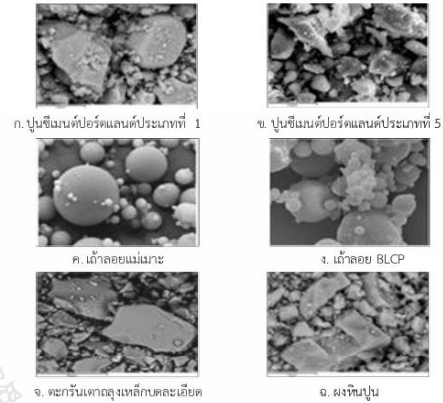
ปัจจุบันสิ่งก่อสร้างต่างๆที่ใช้คอนกรีตเป็นวัสดุเมื่อสัมผัสกับสารละลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) ทำให้คอนกรีตถูกกัดกร่อน ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างบางส่วนเสียหาย ดังนั้นการก่อสร้างอาคารคอนกรีตจึงเป็นข้อพิจารณาความคงทนของคอนกรีตที่สัมผัสกับสารละลายซัลเฟตซึ่งเป็นปัจจัยหลักประการหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาในการก่อสร้างอาคาร เช่น น้ำใต้ดิน น้ำทะเล บริเวณชายฝั่งทะเล และน้ำเสียจากโรงงาน เป็นต้น สภาพแวดล้อมดังกล่าวมีสารละลายซัลเฟตเจือปนอยู่จำนวนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมสถานที่นั้น สารละลายซัลเฟตสามารถกัดกร่อนสร้างความเสียหายให้กับคอนกรีตโดยตรง ส่งผลกระทบต่อสิ่งก่อสร้างนั้นเสียหายตามไปด้วย นำไปสู่การพังทลายของโครงสร้างทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณในการซ่อมแซม จากการสืบค้นผลงานวิจัย [1,2,3,4] ซึ่งให้ผลในแนวทางเดียวกัน กล่าวคือการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan materials) เช่น เถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น ในอัตราส่วนที่เหมาะสมสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดี อย่างไรก็ตามปัจจัยบางอย่างก็ให้ผลในด้านลบได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์จะดีกว่าไม่มีการแทนที่เมื่อสัมผัสกับสารละลายไฮเดียมซัลเฟต แต่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต กลับแย่กว่าเมื่อเทียบกับการไม่แทนที่ [1,2,4]

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายไฮเดียมซัลเฟต (เถ้าลอยจำนวน 4 ชนิด ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูน) ซึ่งเป็นวัสดุภาคอุตสาหกรรมแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้วัสดุภาคอุตสาหกรรมดังกล่าวกับโครงสร้างคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เถ้าลอย (จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจำนวน 3 ชนิด และ BLCP จำนวน 1 ชนิด) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูน (ขนาด 8 ไมโครเมตร) มวลรวมใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และสารละลายซัลเฟตไฮเดียมซัลเฟต โดยรูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาโดยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) กำลังขยาย 3,500 เท่า ส่วนตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความชื้นโดยวิธีเบนของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 1 ลักษณะของอนุภาคของวัสดุประสานซึ่งเป็นภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,500 เท่า

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความชื้นโดยวิธีเบน ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

องค์ประกอบทางเคมี (โดยเฉลี่ยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		เถ้าลอย				ตะกรันเตาถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟุ้ง	ผงหินปูน
	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5	แม่เมาะ			BLCP			
			FA	FB	FC				
SiO ₂	18.93	20.97	35.71	26.61	25.22	61.46	34.06	92.00	0.45
Al ₂ O ₃	5.51	3.89	20.44	13.60	13.88	20.27	16.27	0.70	0.05
Fe ₂ O ₃	3.31	4.34	15.54	18.34	17.39	5.56	1.70	1.20	0.03
CaO	69.53	63.86	16.52	24.97	26.25	1.73	36.05	0.20	55.20
MgO	1.24	3.33	2.00	2.33	2.38	0.96	7.38	0.20	0.34
Nb ₂ O ₅	0.15	2.12	1.15	1.75	1.40	0.73	2.16	-	< 0.01
K ₂ O	0.31	0.12	2.41	1.77	1.92	1.36	0.21	-	< 0.01
SO ₃	2.88	0.47	4.26	8.53	9.44	0.38	1.09	1.50	0.01
LCI	-	1.44	0.49	0.53	0.56	5.38	1.44	-	43.12
Free line	1.00	1.01	1.71	3.93	3.06	0.03	-	-	-
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	3.18	2.53	2.35	2.61	2.22	2.96	2.21	2.69
ความชื้นโดยวิธีเบน (%)	3.190	3.340	2.723	2.867	2.820	2.722	4.600	-	5.210

หมายเหตุ : เมื่อด้วยวิธีเบนไม่สามารถใช้ค่าความชื้นของซิลิกาฟุ้งได้ (อาจใช้วิธี nitrogen absorption แทน)

2.2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาการขยายตัวของสารละลายไฮเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูน โดยวัดการขยายตัว (Expansion) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายไฮเดียมซัลเฟต รายละเอียดสัดส่วนผสมของวัสดุประสานที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 โดยน้ำหนัก ตลอดจนการศึกษา

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมมอร์ตาร์ผสมแฉะลอย ตะกรันเตาแดงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ที่ใช้ในการศึกษา

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		แฉะลอย				ตะกรันเตาแดงเหล็กบดละเอียด	ซิลิกาฟูม	ผงหินปูน
	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5	FA	FB	FC	FD			
C1	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-
C5	-	1.00	-	-	-	-	-	-	-
20FA	0.80	-	0.20	-	-	-	-	-	-
40FA	0.60	-	0.40	-	-	-	-	-	-
20FB	0.80	-	-	0.20	-	-	-	-	-
40FB	0.60	-	-	0.40	-	-	-	-	-
20FC	0.80	-	-	-	0.20	-	-	-	-
40FC	0.60	-	-	-	0.40	-	-	-	-
20FD	0.80	-	-	-	-	0.20	-	-	-
40FD	0.60	-	-	-	-	0.40	-	-	-
30SL	0.70	-	-	-	-	-	0.30	-	-
50SL	0.50	-	-	-	-	-	0.50	-	-
55F	0.95	-	-	-	-	-	-	0.05	-
105F	0.99	-	-	-	-	-	-	0.10	-
5LP	0.95	-	-	-	-	-	-	-	0.05
10LP	0.99	-	-	-	-	-	-	-	0.10
15FA-SLP	0.80	-	0.15	-	-	-	-	-	0.05
10FA-SLP	0.80	-	0.10	-	-	-	-	-	0.10
35FA-SLP	0.60	-	0.35	-	-	-	-	-	0.05
30FA-SLP	0.60	-	0.30	-	-	-	-	-	0.10
15FB-SLP	0.80	-	-	0.15	-	-	-	-	0.05
30FB-SLP	0.60	-	-	0.30	-	-	-	-	0.10
15FC-SLP	0.80	-	-	-	0.15	-	-	-	0.05
30FC-SLP	0.60	-	-	-	0.30	-	-	-	0.10
15FD-SLP	0.80	-	-	-	-	0.15	-	-	0.05
30FD-SLP	0.60	-	-	-	-	0.30	-	-	0.10
25SL-SLP	0.70	-	-	-	-	-	0.25	-	0.05
20SL-SLP	0.70	-	-	-	-	-	0.20	-	0.10
45SL-SLP	0.50	-	-	-	-	-	0.45	-	0.05
40SL-SLP	0.50	-	-	-	-	-	0.40	-	0.10
55F-SLP	0.99	-	-	-	-	-	-	0.05	0.05
105F-SLP	0.85	-	-	-	-	-	-	0.10	0.05

หมายเหตุ

- C1 หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน
- C5 หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วน
- 20FA หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่แฉะลอยชนิด A ร้อยละ 20
- 30SL หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ตะกรันเตาแดงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 30
- 5LP หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ผงหินปูนร้อยละ 5
- 15FA-SLP หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่แฉะลอยชนิด A ร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5
- 25SL-SLP หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ตะกรันเตาแดงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 25 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5

2.3 วิธีการศึกษา

การศึกษาการขยายตัวของมวลสารละลายไฮเดรตซีเมนต์ของตัวอย่างมอร์ตาร์โดยใช้ขนาดตัวอย่าง 25x25x285 มม.³ ทำการบ่มตัวอย่างในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างมอร์ตาร์ไปแช่ในสารละลายไฮเดรตซีเมนต์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยทำการทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างในสารละลายไฮเดรตซีเมนต์ที่อายุ 2, 4, 8 และ 13 สัปดาห์ และทุกๆ 8 สัปดาห์ซึ่งแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ตาร์ใช้ 3 ตัวอย่างเพื่อเฉลี่ยค่าการขยายตัว โดยใช้ปริมาณของสารละลายซีเมนต์ต่อ

ปริมาณของตัวอย่างมอร์ตาร์เท่ากับ 4:1 และมีการเปลี่ยนสารละลายซีเมนต์ทุกๆ 2 เดือนของการแช่ตัวอย่าง

3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

การพิจารณาการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายไฮเดรตซีเมนต์นั้น ได้พิจารณาผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน และผลกระทบจากชนิดของแฉะลอย ต่อการขยายตัวในสารละลายไฮเดรตซีเมนต์โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการขยายตัวของมอร์ตาร์

1) วัสดุประสานรวม 2 ชนิด

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์กับอายุการแช่ในสารละลายไฮเดรตซีเมนต์ของตัวอย่างที่ใช้วัสดุประสานรวม 2 ชนิด พบว่า การขยายตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณโมลของซิลิกาฟูม (C₂A) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ทำให้เกิดปริมาณเอพิซิมและ Ettringite มากกว่า ส่งผลให้เกิดการขยายตัวที่มากกว่า ส่วนการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมแฉะลอย (ทั้ง 4 ชนิด) ร้อยละ 20 และ 40 (รูปที่ 2ก ถึง 2ง) มีค่าน้อยกว่า หรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ด้วยแฉะลอยนั้นเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ และผลจากปฏิกิริยาปอกโซลานจะช่วยลด Ca(OH)₂ จึงทำให้เกิดเอพิซิมและ Ettringite น้อย ส่งผลให้เกิดค่าของการขยายตัวน้อย โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ปริมาณแฉะลอยที่มากขึ้น (ร้อยละ 40)

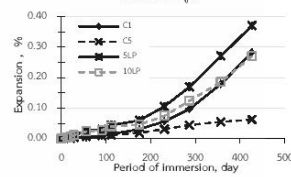
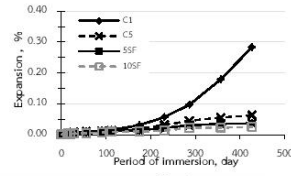
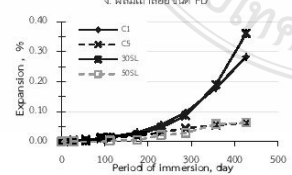
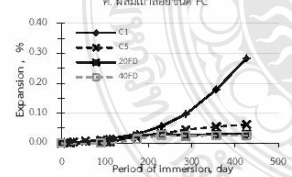
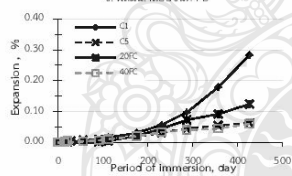
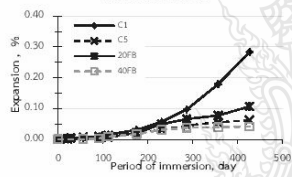
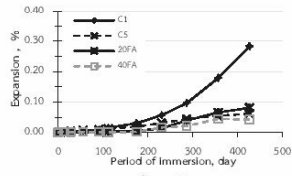
สำหรับการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาแดงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 30 มีแนวโน้มมากกว่าหรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ตะกรันเตาแดงเหล็กบดละเอียดซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 36.05) ในปริมาณที่น้อยนั้น ปฏิกิริยาปอกโซลานเกิดขึ้นซึ่งทำให้ลดปริมาณ Ca(OH)₂ ได้น้อยกว่าให้ Ettringite เกิดมาก ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาแดงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 50 มีค่าการขยายตัวใกล้เคียงหรือแนวโน้มที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ร้อยละ 50 ทำให้ปฏิกิริยาปอกโซลานเกิดมาก สามารถลดปริมาณ Ca(OH)₂ ได้มากทำให้เกิด Ettringite น้อย

ส่วนการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูมทั้งร้อยละ 5 และ 10 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วน โดยเฉพาะร้อยละ 10 มีค่าการขยายตัวที่น้อยกว่าร้อยละ 5 ทั้งนี้เพราะการแทนที่หรือผสมด้วยซิลิกาฟูมนั้นเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ รวมทั้งปฏิกิริยาปอกโซลานไปช่วยลดปริมาณ Ca(OH)₂ ทำให้ลดปริมาณ Ettringite นอกจากนี้ซิลิกาฟูมซึ่งมีอนุภาคค่อนข้างละเอียดสามารถช่วยเติมเต็มในช่องว่างของโพสค์ทำให้สารละลายไฮเดรตซีเมนต์เข้าไดยากขึ้น จากเหตุผลที่กล่าวมาจึงทำให้การขยายตัวมีค่าน้อยกว่า

ในส่วนการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 จะมีแนวโน้มมากกว่าหรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เนื่องจากผงหินปูนไม่มีคุณสมบัติการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่จะมี

คุณสมบัติทางกายภาพ กล่าวคือผงหินปูนจะเข้าไปอุดช่องว่างในมอร์ตาร์ทำให้มอร์ตาร์มีความแน่นเพิ่มขึ้น และทำให้ช่องว่างเหลือน้อยลงสำหรับการเกิด Ettringite ทำให้เกิดการขยายตัวมากขึ้น และพบว่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 มีค่ามากกว่าของร้อยละ 10 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการผสมผงหินปูนร้อยละ 5 อาจทำให้มอร์ตาร์มีความทึบแน่นมากกว่าร้อยละ 10 จึงมีช่องว่างสำหรับเกิด Ettringite น้อยกว่า จึงทำให้เกิดการขยายตัวมากกว่า

ส่วนรูปที่ 3 แสดงการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ผสมแฉะลอย ผสมตะกอนดินโคลนเหล็กบดละเอียด ผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูน ที่อายุ 61 สัปดาห์ ซึ่งเห็นได้ชัดจนถึงผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานดังกล่าว ต่อการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกาขยายตัวกับอายุในการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ผสมแฉะลอย ผสมตะกอนดินโคลนเหล็กบดละเอียด ผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูน

รูปที่ 3 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ผสมแฉะลอย ผสมตะกอนดินโคลนเหล็กบดละเอียด ผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูน ที่อายุ 61 สัปดาห์

- วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์กับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด พบว่า การขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมแฉะลอย FA ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และผสมแฉะลอยร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 (รูปที่ 4ก) จะมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ด้วยแฉะลอย FA ซึ่งมีปริมาณ CaO ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 16.52) ในปริมาณที่ต่ำผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยลด $Ca(OH)_2$ ได้น้อยจึงทำให้เกิด Ettringite มากขึ้น และผงหินปูนจะช่วยให้การเติมเต็มช่องว่างทำให้ตัวอย่างมอร์ตาร์มีช่องว่างน้อยลง ส่วนมอร์ตาร์ผสมแฉะลอย FA ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และผสมแฉะลอย FA ร้อยละ 35 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 กลับให้ค่าการขยายตัวที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะการผสมแฉะลอย FA ในปริมาณมากเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ตั้ง และทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้มากขึ้น จึงทำให้เกิด Ettringite น้อยลง อีกทั้งผงหินปูนซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กมีความสามารถในการอุดช่องว่างทำให้ไอออนซัลเฟตเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ยากขึ้น

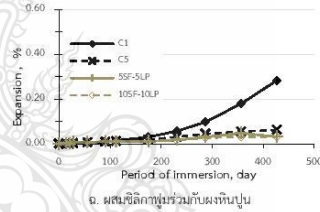
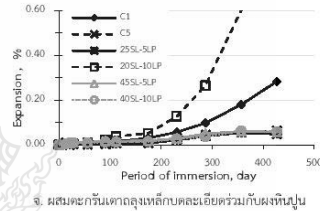
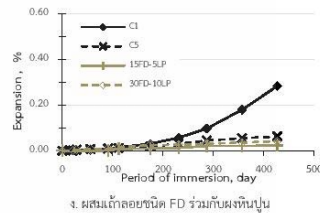
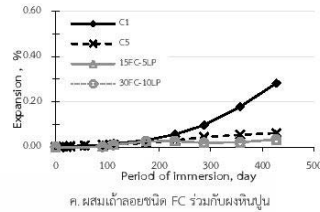
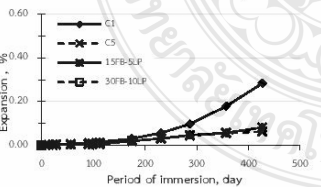
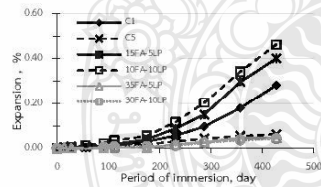
ส่วนการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมแฉะลอย FB, FC และ FD ซึ่งเป็นการผสมแฉะลอยแต่ละชนิดร่วมกับผงหินปูน (รูปที่ 4ข ถึง 4ง) พบว่าทุกสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ให้ค่าที่น้อยกว่าหรือใกล้เคียง

กับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยเฉพาะถ้าเลย FD ซึ่งมีปริมาณ CaO ค่อนข้างต่ำ (ร้อยละ 1.75) จะทำให้เกิด Ettringite ได้น้อยมาก ซึ่งเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

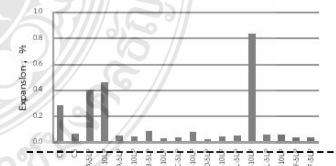
รูปที่ 4 แสดงการขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน พบว่า การขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 จะมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากการผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 36.05) ในปริมาณที่น้อยนั้น ปฏิกริยาปอกโซลานเกิดขึ้นซึ่งทำให้ลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ ได้น้อยทำให้ Ettringite เกิดมาก และผงหินปูนส่งผลให้มอร์ต้าร์มีความแน่นขึ้น จึงทำให้มีช่องว่างไม่เพียงพอต่อการเกิด Ettringite ทำให้เกิดการขยายตัวมาก อย่างไรก็ตามในการเตรียมมอร์ต้าร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 และผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 45 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 กลับให้ค่าการขยายตัวใกล้เคียงกับของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

รูปที่ 4d แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่สารละลายไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และผสมซิลิกาฟูมร่วมกับผงหินปูน พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมซิลิกาฟูมร่วมกับผงหินปูนทุกสัดส่วนผสมที่ศึกษามีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

รูปที่ 5 แสดงการขยายตัวในสารละลายไฮดรอกไซด์ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน และผสมซิลิกาฟูมร่วมกับผงหินปูน ที่อายุ 61 สัปดาห์ ซึ่งทำให้เห็นได้ชัดเจนถึงผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานดังกล่าวต่อการขยายตัวในสารละลายไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุในการแช่สารละลายไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน และซิลิกาฟูมร่วมกับผงหินปูน



รูปที่ 5 การขยายตัวในสารละลายไฮดรอกไซด์ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน และผสมซิลิกาฟูมร่วมกับผงหินปูน ที่อายุ 61 สัปดาห์

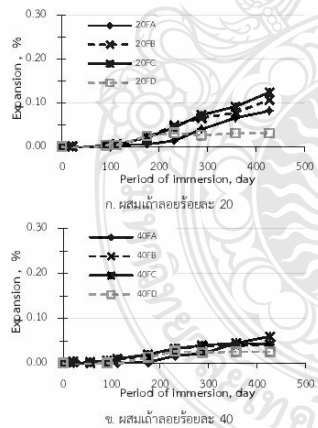
3.2 ผลกระทบจากชนิดของเถ้าลอยต่อการขยายตัวของมอร์ตาร์ใน 4.

สารละลายโซเดียมซัลเฟต

สำหรับชนิดของเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้มี 4 ชนิด คือเถ้าลอยแม่เมาะ จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ FA, FB และ FC และอีก 1 ชนิด เป็นเถ้าลอย BLCF คือ FD จากการพิจารณาถึงผลกระทบจากชนิดของเถ้าลอยต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต มีรายละเอียดดังนี้

รูปที่ 6 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของมอร์ตาร์กับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด พบว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 (รูปที่ 6ก) การขยายตัวของมอร์ตาร์เถ้าลอย FC มีค่าการขยายตัวมากที่สุด ถัดมาเป็นเถ้าลอย FB, FA และ FD ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะปริมาณ CaO ของเถ้าลอย FC มีค่ามากที่สุด (ร้อยละ 26.25) ถัดมาของเถ้าลอย FB (ร้อยละ 24.97) เถ้าลอย FC (ร้อยละ 16.52) และของ FD น้อยที่สุด (ร้อยละ 1.73) จึงส่งผลให้การขยายตัวมีค่ามากขึ้นตามปริมาณ CaO ที่สูง เมื่อแทนในปริมาณน้อย (ร้อยละ 20) เหตุผลดังกล่าวมาแล้ว และรวมทั้งปริมาณ Free CaO ของเถ้าลอย FC และ FB มีค่าค่อนข้างสูง (ร้อยละ 3.06 และ 3.93 ตามลำดับ) ซึ่งทำให้เกิด $Ca(OH)_2$ มากขึ้น ส่งผลให้เกิด Ettringite มากขึ้น

ส่วนรูปที่ 6ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของมอร์ตาร์กับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด ร้อยละ 40 พบว่าการขยายตัวของมอร์ตาร์เถ้าลอยแต่ละชนิดเมื่อเปรียบเทียบกับมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 กล่าวคือเถ้าลอย FC มีค่าการขยายตัวมากที่สุด ถัดมาเป็นเถ้าลอย FB, FA และ FD ตามลำดับ โดยการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 จะมีค่าน้อยกว่าของผสมเถ้าลอยร้อยละ 20



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุในการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน

4. บทสรุป

จากผลการศึกษาดังกล่าววิจัยนี้ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น การขยายตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่การขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ยกเว้นเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนอย่างเดียว และแทนที่ด้วยเถ้าลอยหรือตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่น้อยๆ ไม่ว่าจะแทนอย่างเดียว และ/หรือร่วมกับผงหินปูน จะให้ค่าการขยายตัวมากกว่าหรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

2. การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูง มีแนวโน้มให้ค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์มากกว่าเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO ต่ำ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณประจำปีในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปริญา จินดาประเสริฐ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล "ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต" ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ, วัสดุปอซโซลาน, พิมพ์ครั้งที่ 7.
- [2] American Society for Testing and Material, **Annual Book of ASTM Standard**, V 04.02, Easton, Md., USA, 1996.
- [3] กระทรวงอุตสาหกรรม, "กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต," มาตรฐาน มอก.2135-2545. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2546, หน้า 3.
- [4] สหภาพ หอมวุฒิจงค์, ดิลก สุรัตน์เวช และ ชัย จตุรพิทักษ์กุล, "การทดสอบและแปรผลการทดสอบต่อคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน," การสัมมนาทางวิชาการเรื่องถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในการคอนกรีต, ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [5] Krammart P. and Tangtermisirikul S., 2002. "Strength Reduction and Expansion of Mortars with Fly Ash," Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand, V.13, No.3 pp. 9-16.
- [6] Krammart P. and Tangtermisirikul S., 2004. "Expansion, Strength Reduction and Weight Loss of Fly Ash Concrete in Sulfate Solution," ASEAN Journal on SCIENCE & TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT, V12.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	นายอภิชา หนูพันธ์
วัน เดือน ปีเกิด	24 เมษายน 2518
ที่อยู่	11 ซอย 4 ถนนราษฎร์อุทิศ 1 ตำบลบ่อทราย อำเภอเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา 90110
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ประสบการณ์การทำงาน	ครูวิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่ พ.ศ. 2552 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	091-847-8926
อีเมลล์	apicha.c5@gmail.com

