การต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน

SULFATE RESISTANCE OF MORTAR WITH LIMESTONE POWDER

สุขชัย สุขยานุดิษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน

สุขชัย สุขยานุดิษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน
ชื่อ - นามสกุล	นายสุขชัย สุขยานุดิษฐ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิติศานต์ กร้ำมาตร
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเอาฝุ่นหินปูนมาใช้สำหรับคอนกรีตที่สัมผัสสิ่งแวดล้อมซัลเฟต ซึ่งเป็นอีกหนึ่งทางเลือกของการพัฒนาคอนกรีตด้านการต้านทานซัลเฟต

การศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนในครั้งนี้ ใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน แทนที่เถ้าลอย และแทนที่ฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอย แล้ววัดการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังกล่าว ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต และโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

ผลการศึกษาพบว่าในสารละลายซัลเฟต การขยายตัวของมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูน(ร้อยละ 5 และ 10) มีแนวโน้มการขยายตัวน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนแต่มากกว่าหรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ในขณะที่มอร์ต้าร์เถ้าลอย (ร้อยละ 20 และ 40) และมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยมีค่าการขยายตัวน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนและมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยในสารละลายซัลเฟตมีค่าไม่แตกต่างกันโดยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์เถ้าลอยในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน แต่ในโซเดียมซัลเฟตกลับมีค่าน้อยกว่า และพบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่ามากที่สุด ถัดมาเป็นโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ตามลำดับ ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่ามากที่สุด ถัดมาเป็นโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต และโซเดียมซัลเฟตตามลำดับ ส่วนการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงกว่า จะมีค่ามากกว่าเมื่อใช้อัตราส่วนที่ต่ำกว่า สุดท้ายพบว่าสัดส่วนที่แทนที่ฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สามารถต้านทานซัลเฟตโดยรวมได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

คำสำคัญ : ฝุ่นหินปูน เถ้าลอย สารละลายซัลเฟต มอร์ต้าร์ การขยายตัว การสูญเสียน้ำหนัก

Thesis Title	Sulfate Resistance of Mortar with Limestone Powder
Name - Surname	Mr.Sukachai Sukayanudist
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Pitisan Krammart
Academic Year	2011

ABSTRACT

This thesis is aimed to be used limestone powder for concrete exposure to sulfate environment which is another alternative to develop the sulfate-resisting concrete.

Studies on sulfate resistance of mortar with limestone powder, Portland cement mortar and blended Portland cement mortar containing limestone powder, fly ash, and limestone powder-fly ash mixture were used. The expansion and weight loss of mortar specimens immersed in sulfate solutions, namely sodium sulfate, magnesium sulfate and combined sodium-magnesium sulfates were considered.

The results revealed that under continuous sulfate solution exposure the length changes of limestone powder replacing cement mortar (5% and 10%) were less than those of Portland cement type I but showed greater than or similar to that of Portland cement type V. Regarding the mortar replaced with fly ash (20% and 40%) and ternary blended cement (limestone powder and fly ash cement), the expansion was less than that of plain cement. Results of weight loss of limestone powder replacing cement mortar and ternary blended cement mortar exposed to sulfates solution were not significant differences and exhibited rater small than plain cement. On the other hand, fly ash replacing cement showed more loss in weight especially exposed to magnesium sulfate and combined sodium-magnesium sulfates but contrary to sodium sulfate. For influence of sulfate solution, the expansion of mortar bar specimens in sodium sulfate was higher than that in combined sodium-magnesium sulfates and magnesium sulfates, respectively. In case of the weight loss, it can be observed that the remained loss in mass of mortar immersed in magnesium sulfates lose more than that in combined sodium-magnesium sulfates and sodium sulfate. It should be noted further that expansion and weight loss of the mortar were dependent on water to binder ratio. The addition of w/b greatly increased the expansion and weight loss of specimens. Finally, the cement mixtures containing limestone powder and fly ash in the Portland cement showed better performance in sulfate resistance than plain cement.

Keywords : limestone powder, fly ash, sulfate solution, mortar, expansion, weight loss

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยในการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา แขนงวิศวกรรมโครงสร้าง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในช่วงปี พุทธศักราช 2550 - 2554 โดยทำการวิจัยเรื่อง การต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (Sulfate Resistance of Mortar with Limestone Powder) ผู้วิจัยต้องกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิติศานต์ กร้ำมาตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาของการศึกษาและวิจัยเป็นอย่างดี ศาสตราจารย์ ดร. สมนึก ตั้งเติมสิริกุล แห่งสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างมากต่องานวิจัยนี้ อาจารย์ ดร. จตุพล ตั้งปกาศิต อาจารย์ ดร. บุญชัย ผึ้งไผ่งาม ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่พันตรี อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่คอยจุดประกายแห่งความหวังและเติมเต็มพลังแห่งการสู้ต่อในยามท้อแท้ ซึ่งหลายครั้งหลายคราที่ประกายแห่งความหวังดังกล่าวได้เคยดับล่วงไป นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัทสยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์บางส่วนสำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้

และเหนือสิ่งอื่นใดผู้วิจัยขอกราบแทบเท้าขอบพระคุณ คุณพ่อสำรวย สุขยานุดิษฐ์ คุณแม่ไว สุขยานุดิษฐ์ และบรรพบุรุษทุกท่านที่ต่อสู้และอดทนกับการทำนาเพื่อส่งลูกเรียนจนมีวันนี้ได้ รวมถึงขอบใจ น้องๆผู้วิจัย ลัดดา สุขยานุดิษฐ์ ขวัญใจ สุขยานุดิษฐ์ สุรัตน์ สุขยานุดิษฐ์ จณิศตา สุขยานุดิษฐ์ และครอบครัว สุขยานุดิษฐ์ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจอันยิ่งใหญ่ด้วยดีตลอดมาและกราบขอบพระคุณครูทุกท่านที่เคยอบรมสั่งสอนผู้วิจัยตั้งแต่เล็กจนโตและที่ลืมไม่ได้คือผู้มีพระคุณทุกท่านต่อผู้วิจัยรวมถึงผู้ที่เกี่ยวข้องหลายๆท่านที่อาจมิได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ และหากความดีที่อาจมีอยู่บ้างในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ผู้วิจัยขออุทิศส่วนกุศลแห่งความดีนี้ให้กับดวงวิญญาณทุกดวงที่เคยมีพระคุณต่อผู้วิจัยด้วยความอาลัยรักชั่วนิจนิรันดร์

สุขชัย สุขยานุดิษฐ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟต	5
2.3 ฝุ่นหินปูน	7
2.4 เถ้าลอย	9
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
3 วิธีดำเนินการวิจัย	24
3.1 วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	24
3.2 ขอบเขตของการวิจัย	27
3.3 การเตรียมสารละลายซัตเฟต	29
3.4 สัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการวิจัย	29
4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์	34
4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ใช้ในการวิจัย	34
4.2 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต	39
4.3 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต	99

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

4.4 สรุปผลการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน..... 123

5 สรุปและข้อเสนอแนะ..... 124

5.1 สรุป……..... 124

5.2 ข้อเสนอแนะ……..... 125

รายการอ้างอิง..... 126

ภาคผนวก..... 128

ภาคผนวก ก ตารางค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 92 สัปดาห์ (644 วัน)..... 129

ภาคผนวก ข ตารางค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 92 สัปดาห์ (644 วัน)..... 140

ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่..... 150

ประวัติผู้เขียน..... 165

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 สภาวะของซัลเฟต..... 5

2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618..... 10

2.3 ข้อกำหนดคุณลักษณะทางเคมีของเถ้าลอย ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 2135-2545. 11

2.4 ข้อกำหนดคุณลักษณะทางเคมีของเถ้าลอย ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 2135-2545 (เพิ่มเติม)..... 12

2.5 ข้อกำหนดคุณลักษณะทางฟิสิกส์ของเถ้าลอย ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 2135 -2545..... 12

2.6 ข้อกำหนดคุณลักษณะทางฟิสิกส์ของเถ้าลอย ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 2135 -2545 (เพิ่มเติม)..... 14

2.7 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2528 – 2544..... 17

2.8 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ..... 18

3.1 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการวิจัย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55..... 30

4.1 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน และขนาดอนุภาคเฉลี่ย ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ฝุ่นหินปูน และเถ้าลอย ที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้..... 35

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร และเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา..... 38

4.3 สรุปผลการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน..... 123

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

3.1 เครื่องผสมมอร์ต้าร์ 25

3.2 แบบหล่อชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ 25

3.3 เครื่องวัดความยาว 26

3.4 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม 26

3.5 ถังสำหรับแช่ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ 27

4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (ขนาด 3,500 เท่า) 37

4.2 ลักษณะการกระจายสะสมของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร และ เถ้าลอยในเทอมของร้อยละค้างสะสม 37

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 41

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 42

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 42

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 43

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 44

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 46

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 47

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 47

4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 48

4.13 เปรียบเทียบการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 532 วัน 49

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 52

4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 52

4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 53

4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 54
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 55
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 56
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 57
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 57
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 58
4.24 เปรียบเทียบการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 532 วัน..... 59
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 61
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 61
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 62

4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 63

4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 64

4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 65

4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 65

4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 66

4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 66

4.35 เปรียบเทียบการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) 532 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55..... 67

4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 69

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 69

4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 70

4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 70

4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 71

4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 71

4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 72

4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 72

4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 73

4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 74

4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 74

4.48 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 76

4.49 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 76

4.50 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 77

4.51 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 78

4.52 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 78

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.53 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 79
4.54 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 80
4.55 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 80
4.56 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 81
4.57 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 81
4.58 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 82
4.59 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 83
4.60 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 83
4.61 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.62 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 84
4.63 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 85
4.64 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 85
4.65 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 86
4.66 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 364 วัน (52 สัปดาห์)..... 87
4.67 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นหินปูนหินขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตรร้อยละ 5 และเถ้าลอยร้อยละ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 364 วัน (52 สัปดาห์)..... 88
4.68 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตรร้อยละ 5 และร้อยละ 10 และเถ้าลอยร้อยละ 15 และร้อยละ 30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 364 วัน (52 สัปดาห์)..... 89
4.69 เปรียบเทียบผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)..... 91

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.70 เปรียบเทียบผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร และแทนที่ด้วยเถ้าลอย ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)……..... 94

4.71 เปรียบเทียบผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตรร่วมกับเถ้าลอย ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)..... 99

4.72 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 644 วัน..... 100

4.73 เปรียบเทียบการการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 644 วัน..... 101

4.74 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)..... 102

4.75 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)..... 103

4.76 เปรียบเทียบการการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 644 วัน..... 104

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.77 เปรียบเทียบการการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 644 วัน..... 105
4.78 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)..... 106
4.79 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)..... 107
4.80 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) 644 วัน 108
4.81 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) 644 วัน 108
4.82 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)..... 109
4.83 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)..... 110
4.84 เปรียบเทียบการการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน และฝุ่นหินปูนผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 644 วัน..... 112

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.85 เปรียบเทียบการการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน และฝุ่นหินปูนผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 644 วัน..... 112

4.86 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)..... 113

4.87 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียม 644 วัน..... 114

4.88 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียม 644 วัน..... 114

4.89 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)..... 115

4.90 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน และแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนผสมเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) 644 วัน..... 116

4.91 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน และแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนผสมเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) 644 วัน..... 116

4.92 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)..... 117

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.93 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายซัลเฟต 644 วัน..... 118

4.94 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายซัลเฟต 644 วัน..... 119

4.95 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วนและชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)..... 120

4.96 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายซัลเฟต 644 วัน..... 121

4.97 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายซัลเฟต 644 วัน..... 121

4.98 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยทั้งฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)..... 122

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

โครงสร้างคอนกรีตทั่วไปที่ต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีสารซัลเฟต (SO_4^{2-}) ที่อยู่ในรูปของสารละลายซัลเฟตสามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ ตัวอย่างของซัลเฟตที่พบมากในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อคอนกรีต เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) เป็นต้น ความเสียหายจากซัลเฟตที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตนั้นจะเกิดการผุกร่อน พองตัว และแตกร้าวอย่างรุนแรง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดความเข้มข้นของซัลเฟตและความชื้น จากผลการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา [1] พบว่า ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (Fly Ash) ในอัตราส่วนที่เหมาะสมสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดี แต่ในกรณีของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้นพบว่า การต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์จะแย่กว่าเมื่อเทียบกับการไม่แทนที่

ในปัจจุบันประเทศไทยได้ผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหิน โดยมีผลผลิต (By Product) ที่เหลือใช้เป็นเถ้าลอยของเถ้าถ่านหิน (Fly Ash) ประมาณปีละ 3 ล้านตัน [2] ในขณะที่ฝุ่นหินปูน (Limestone Powder) เป็นผลพลอยได้จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมในการผลิตปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จหรือเป็นผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมการผลิตผง $CaCO_3$ โดยอนุภาคของฝุ่นหินปูนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 ไมโครเมตร จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนในสัดส่วนที่เหมาะสมจะให้กำลังอัดระยะต้นที่สูงกว่ามอร์ต้าร์ที่ผสมสารปอซโซลานหลายชนิด [3,4,5,6] ดังนั้นจึงน่าจะนำเอาข้อดีดังกล่าวของฝุ่นหินปูนมาศึกษาในเรื่องการต้านทานซัลเฟต โดยเฉพาะในกรณีแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งเมื่อใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะให้ผลการต้านทานที่แย่ลงเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่แทนที่

นอกจากนี้จะเห็นว่า แม้ผลการวิจัยในต่างประเทศเมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์จะช่วยต้านทานโซเดียมซัลเฟตได้ดี [7] แต่เถ้าลอยที่ได้มาจะไม่เหมือนกับของประเทศเรา ส่วนในกรณีแมกนีเซียมซัลเฟตนั้นในต่างประเทศยังไม่ค่อยมีการกล่าวถึง หรือพูดได้ว่าในมาตรฐานต่างประเทศ เช่น ACI ไม่ได้กล่าวถึงกรณีของแมกนีเซียมซัลเฟตเลย อีกอย่างในธรรมชาติของสิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟตนั้น จะไม่มีเพียงชนิดใดชนิดหนึ่งเท่านั้น นั่นก็เช่นเดียวกันยังไม่มีการกล่าวถึงกรณีเมื่อโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต

ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน รวมทั้งมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานผสมในส่วนผสมด้วย โดยวัดการขยายตัว (Expansion) และหาการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ เมื่อสัมผัสกับสารละลายโซเดียมแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อัตราส่วน 3:1 เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตเมื่อเผชิญกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต โดยเฉพาะในกรณีของแมกนีเซียมซัลเฟต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน รวมทั้งมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าลอยในส่วนผสมกับตัวอย่างปูนซีเมนต์ล้วนที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

1.2.2 เพื่อเลือกส่วนผสมของคอนกรีตผสมฝุ่นหินปูนรวมทั้งคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยผสมในส่วนผสมเมื่อเผชิญกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

1.2.3 เพื่อเป็นข้อมูลในการจัดทำมาตรฐานในด้านความคงทนของคอนกรีตต่อไป

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 วัสดุประสานที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย วัสดุประสาน 4 ชนิดได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย (4 และ 14 ไมโครเมตร) และเถ้าลอย

1.3.2 ในการประเมินความต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตนั้น ได้ใช้การวัดการขยายตัว (Expansion) และการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 ที่อายุ 2, 3, 4, 8, 13 และ 16 สัปดาห์ของการแช่ในสารละลายซัลเฟต หลังจากนั้นให้ทำการวัดตัวอย่างทุก ๆ อายุ 2 เดือนของการแช่ในสารละลายซัลเฟต

1.3.3 สารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ได้ใช้โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (Na_2SO_4+$MgSO_4$) ที่อัตราส่วน 3:1

1.3.4 ทำการวัดการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟต

1.3.5 เปรียบเทียบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟต โดยพิจารณาผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน ผลกระทบจากความละเอียดของฝุ่นหินปูน ผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟต และผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนและผสมเถ้าลอยที่แช่ในสารละลายซัลเฟต

1.4.2 ทราบถึงความสามารถในการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย

1.4.3 ทราบถึงผลกระทบของการใช้ฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ต่อคุณสมบัติในด้านการต้านทานซัลเฟต

1.4.4 ทราบถึงอัตราส่วนในการแทนที่ที่เหมาะสมของฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในด้านการต้านทานซัลเฟต

1.4.5 เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาการออกแบบส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนรวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความสำคัญอีกชนิดหนึ่งสำหรับงานด้านวิศวกรรมโยธา ในอดีตที่ผ่านมาวิศวกรโยธาและผู้ที่เกี่ยวข้องกับการใช้คอนกรีตได้คำนึงถึงกำลังรับแรงอัดประลัยที่ 28 วันของคอนกรีตเป็นหลักในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก รวมถึงมาตรฐานในการดำเนินการก่อสร้างงานคอนกรีตเสริมเหล็กต่างๆ แต่ปัจจุบันสภาวะแวดล้อมของโลกได้เปลี่ยนแปลงไปมาก ทำให้คอนกรีตต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่มีโอกาสทำให้อายุการใช้งานของคอนกรีตลดลง ดังนั้นการนำคอนกรีตไปใช้โดยคำนึงถึงคุณสมบัติด้านกำลังอัดประลัยอย่างเดียวนั้นไม่เพียงพอ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่วิศวกรโยธาและผู้ที่เกี่ยวข้องกับการใช้คอนกรีตจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงอายุการใช้งานของคอนกรีตด้วย นั่นหมายถึงคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมต่างๆกัน

สภาวะแวดล้อมที่มีสารซัลเฟตซึ่งอยู่ในรูปสารละลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) โดยเฉพาะโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีต เนื่องจากสารละลายซัลเฟตสามารถซึมผ่านสู่ภายในเนื้อคอนกรีตเข้าทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ ก่อให้เกิดการผุกร่อน พองตัว และแตกร้าว ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตไม่สามารถใช้งานตามที่ออกแบบไว้ ตัวอย่างของโครงสร้างที่มีโอกาสเสื่อมสภาพจากการทำลายโดยซัลเฟต เช่น โครงสร้างใต้ดิน โครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำทะเลหรือโครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำเสีย โดยทั่วไปในสารละลายซัลเฟตที่พบในสิ่งแวดล้อมนั้นสามารถแบ่งประเภทได้ตามปริมาณซัลเฟตที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อมดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สภาวะของซัลเฟต [8]

สภาพแวดล้อมซัลเฟต	ซัลเฟตในดินที่ละลายน้ำ (SO_4^{-2}) ร้อยละ	ซัลเฟตในน้ำ (ppm)
เบาบาง	0.00 – 0.10	0 – 150
ปานกลาง	0.10 – 0.20	150 – 1,500
รุนแรง	0.20 – 2.00	150 – 10,000
รุนแรงมาก	มากกว่า 2.00	มากกว่า 10,000

2.2 การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

สำหรับกลไกการทำลายของซัลเฟตต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Mechanisms of Sulfate Attack on Portland Cement) นั้น เนื่องจากเกลือซัลเฟต (SO_4^{-2}) ที่อยู่ในรูปของสารละลาย สามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ ตัวอย่างของเกลือซัลเฟตที่พบมากในธรรมชาติและอันตรายต่อคอนกรีต เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) เป็นต้นเกลือซัลเฟตจะมีอยู่มากในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในบริเวณริมทะเลหรือในดินทั่วไป ในน้ำเสีย จากบ้านเรือนหรือตามน้ำพุร้อนธรรมชาติเป็นต้น

ในการศึกษาเรื่องการทำลายโดยซัลเฟตสามารถทำได้โดยนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ หรือคอนกรีต ไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟตหรือแคลเซียมซัลเฟตแต่เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยดังนั้นจึงใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตในการศึกษาครั้งนี้

2.2.1 กลไกการทำลายของโซเดียมซัลเฟต (Mechanisms of Sodium Sulfate Attacks) [7]

กลไกการทำลายของโซเดียมซัลเฟตแสดงดังสมการที่ 2.1 ถึง 2.4 เริ่มต้นเมื่อโซเดียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide: CH) ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาจากไฮเดรชัน ดังแสดงในสมการที่ 2.1 เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) มีความเป็นด่างสูงมาก (pH=13.5) จึงเป็นการรักษาสภาพทั้งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ Ettringite (C_6ASH_{32}) ไม่ทำให้ปฏิกิริยากลายเป็นผลอื่นโดยที่สารยิปซัม ($C\underline{S}H_2$) ที่ได้จากสมการที่ 2.1 จะทำปฏิกิริยากับผลผลิตไฮเดรชันบางตัว เช่น แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C_4AH_{13}) โมโนซัลเฟต ($C_4A\underline{S}H_{12}$) และไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ได้ Secondary Ettringite ดังแสดงในสมการที่ 2.1 ถึง 2.4 โดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลิตผลปฏิกิริยาไฮเดรชั่นชนิดอื่นมาก จึงทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นการทำละลายโซเดียมซัลเฟตจึงเป็นการขยายตัวและแตกร้าวของคอนกรีต

$$CH + N\underline{S} + 2H \longrightarrow C\underline{S}H_2 + NH \quad (2.1)$$

$$C_4AH_{13} + 3C\underline{S}H_2 + 14H \longrightarrow C_6A\underline{S}H_{32} + CH \quad (2.2)$$

$$C_4A\underline{S}H_{12} + 2C\underline{S}H_2 + 16H \longrightarrow C_6A\underline{S}H_{32} \quad (2.3)$$

$$C_3A + 3C\underline{S}H_2 + 26H \longrightarrow C_6A\underline{S}H_{32} \quad (2.4)$$

โดยที่ C = CaO , N = Na_2O , M = MgO , S = SiO_2 , $\underline{S}$ = SO_3 และ H = H_2O

2.2.2 กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟต (Mechanisms of Magnesium Sulfate Attacks) [7]

กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.5 ถึง 2.7จะแตกต่างจากกรณีของโซเดียมซัลเฟต กล่าวคือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MH) หรือ Brucite มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก และค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่าประมาณ 10.5 ซึ่งมีความเป็นด่างที่ไม่สูง ดังนั้นจึงทำให้ทั้ง C-S-H และ Ettingite ไม่เสถียรภาพ นอกจากนี้ C-S-H จะถูกทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตดังแสดงในสมการที่ 2.6 จากสมการที่ 2.5 และ 2.6 ทั้ง $C\underline{S}H_2$ และ MH จะสะสมมากขึ้นโดย $C\underline{S}H_2$ จะถูกสะสมในช่องว่าง (Pores) ของคอนกรีต ส่วน MH จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล (S_2H) ดังแสดงในสมการที่ 2.7 ได้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (M-S-H) ซึ่งไม่มีความสามารถในการยึดประสานเลยดังนั้นการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตจึงเป็นการเปลี่ยน C-S-H เป็น M-S-H การทำลายดังกล่าวทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของซีเมนต์ที่แข็งตัวและจะเกิดการสะสม $C\underline{S}H_2$ โดยไม่เกิดการขยายตัวมากดังกรณีการทำลายของโซเดียมซัลเฟต

$$CH + M\underline{S} + 2H \longrightarrow C\underline{S}H_2 + MH \quad (2.5)$$

$$C_XS_YH_Z + xM\underline{S} + (3x+0.5y-z) \longrightarrow HxC\underline{S}H_2 + xMH + 0.5yS_2H \quad (2.6)$$

$$4MH + SH_{11} \longrightarrow M_4SH_{8.5} + (n-4.5)H \quad (2.7)$$

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายของซัลเฟต

1) สิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟตตลอดจนความเข้มข้นของซัลเฟต

2) ความทึบน้ำของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตเข้าไปได้ยาก ลดการทำลายขั้นรุนแรง

3) ปริมาณ C_3A และ C_4AF ในปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และ C_4AF น้อยมีแนวโน้มต้านทานการทำลายของซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A และ C_4AF สูง และปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วน C_3Sและ C_2S ต่ำก็มีความสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น

4) ปริมาณ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีต ถ้าลดปริมาณของ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตก็ช่วยลดความรุนแรงลงได้ด้วย วิธีการลด $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตอาจทำได้โดยใช้สารวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

2.2.4 วิธีการป้องกันการทำลายโดยซัลเฟต

1) ใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และ C_3S ต่ำ นั่นคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

2) การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนซึ่งช่วยลดปริมาณบางส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) รวมทั้งลด C_3A และยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีตได้ด้วย

3) ลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้ต่ำเพื่อให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้น

4) ออกแบบให้คอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์เพสต์ไม่มากเกินไป

2.3 ฝุ่นหินปูน

ฝุ่นหินปูน (Limestone Powder) เป็นผลพลอยได้จากการย่อยหิน เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จโดยปกติแล้วฝุ่นหินปูนจำนวนมากเหล่านี้มักจะถูกกองเก็บไว้ในบริเวณแหล่งหินย่อยนั้น โดยฝุ่นหินปูนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในระหว่าง 100 ถึง 1 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถก่อตัวให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อมและยังส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของผู้ที่อยู่อาศัยในบริเวณใกล้เคียงแหล่งย่อยหินเหล่านั้น สำหรับฝุ่นหินปูนในประเทศไทยมีเหมืองที่ทำการผลิตอยู่ 2 แหล่งใหญ่ด้วยกันคือ เหมืองหินปูนโดโลมิติกจังหวัดสระบุรี และฝุ่นหินปูนจากเหมืองหินปูนชนิดโดโลไมท์ จังหวัดกาญจนบุรี โดยหินปูนชนิดโดโลมิติก (Dolomitic) และโดโลไมท์ (Dolomite) จัดอยู่ในจำพวกหินคาร์บอเนต (Carbonate Rock) โดยหินคาร์บอเนตที่มีองค์ประกอบของแร่โดโลไมท์อยู่ในปริมาณร้อยละ 10 ถึง 50 จะจัดเป็นหินปูนประเภทโดโลมิติก ในขณะที่มีปริมาณของแร่โดโลไมท์มากกว่าร้อยละ 50 จะจัดเป็นหินปูนประเภทโดโลไมท์โดยองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของหินปูนจะประกอบด้วยสารประกอบ

ของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (Inert Material)และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Reactive Material) มีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจาก คุณสมบัติของวัสดุเองที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี จึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตอีกด้วย ในขณะเดียวกันก็อาจส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนต์เพสต์ สารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี อย่างไรก็ตามสารประกอบดังกล่าวทั้งสองนั้นก็สามารถที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ ถ้าหากสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากเพียงพอ และหรือให้พลังงานความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ดังสมการที่ 2.16 และสมการที่ 2.17

$$CaCO_3+H_2O+heat \longrightarrow Ca(OH)_2+CO_2 \quad (2.8)$$

$$MgCO_3+ H_2O+heat \longrightarrow Mg(OH)_2+CO_2 \quad (2.9)$$

2.3.2 วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำ ดังสมการที่ 2.10

$$CaO+H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 \quad (2.10)$$

ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากสมการข้างต้นนี้ สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ เช่นเดียวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์

ดังนั้นการนำเอาผงหินปูนมาใช้ในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จึงมีความเป็นไปได้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาว อย่างไรก็ตามปริมาณที่

เหมาะสมในการใช้งานผงหินปูนจากแหล่งต่างๆ เมื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุเชื่อมประสาน ซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ที่มีส่วนผสมของวัสดุดังกล่าวให้แน่ชัดก่อนการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2.4 เถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นผลพลอยได้ (By Product) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อนมาใช้เถ้าลอยที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงก้นเตา จึงเรียกกันว่าเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ส่วนเถ้าลอยขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึงประมาณ 200 ไมโครเมตร จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย (Fly Ash) เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบบริเวณโรงไฟฟ้า

เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานใช้ผสมปูนซีเมนต์ทำคอนกรีตได้โดยตามมาตรฐาน ASTM C 618 ได้ให้คำนิยามของเถ้าลอยไว้ว่าเถ้าลอยคือวัสดุเม็ดละเอียดที่เหลือจากการเผาไหม้ของถ่านหิน โดยส่วนมากจะได้มาจากขบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหิน ถ่านหินที่ใช้ในการเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิดเช่นแอนทราไซต์ (Anthracite) บิทูมินัส (Bituminous) ซับบิทูมินัส (Sub Bituminous) และลิกไนต์ (Lignite) โดยถ่านหินคุณภาพดีที่สุดได้แก่แอนทราไซต์สามารถให้ความร้อนสูงสุดและมีปริมาณความชื้นต่ำ ตามด้วยบิทูมินัส ซับบิทูมินัสและลิกไนต์ตามลำดับ โดยลิกไนต์ให้ความร้อนต่ำและมีความชื้นสูง นอกจากถ่านหินทั้ง 4 ชนิดแล้วยังมีพีท (Peat) ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุดให้ความร้อนต่ำสุดและมีความชื้นสูงสุด จึงไม่นิยมใช้ในการเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า โดยเมื่อเผาถ่านหินลิกไนต์แล้วจะเหลือเถ้าลอยประมาณร้อยละ 25 ของปริมาณถ่านหินที่เผา โดยสามารถแบ่งเถ้าลอยลิกไนต์ได้ดังนี้

1) เถ้าลอย (Fly Ash, Pulverized Fuel Ash, Dry Ash) เถ้าลอยเป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกไปสู่ปล่องควัน และถูกดักจับไว้ได้ในเครื่องดักจับ (Electrostatic Precipitator) โดยจะมีประมาณร้อยละ82ของปริมาณเถ้าทั้งหมด

2) เถ้าหนัก (Bottom Ash, Wet Ash) เถ้าหนักเป็นเถ้าที่เกิดจากการปะทะกันของอนุภาคเถ้าในบริเวณสันดาป (Combustion Zone) โดยในบริเวณนี้อุณหภูมิจะสูงพอที่จะหลอมเถ้าที่เป็นเม็ดหรือก้อนตกลงสู่ก้นเตาโดยมีประมาณร้อยละ18 ของเถ้าทั้งหมด

3) ขี้เถ้า (Slag) ขี้เถ้าเป็นเถ้าที่ปะทะกับผนังเตาและหลอมติดกันรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ เมื่อรวมตัวกันจนมีน้ำหนักมากจะตกลงสู่ก้นเตา ซึ่งขี้เถ้ามีปริมาณน้อยมาก

2.4.1 ชนิดของเถ้าลอย

มาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด คือ

1) ชนิด F (Class F) เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส ซึ่งมีปริมาณผลรวมของ SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนักและมีคุณสมบัติอื่นมาตรฐาน ASTM C618 ดังแสดงในตารางที่ 2.2 วิธีการเก็บตัวอย่างและทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide: CaO) ต่ำ

2) ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูนัส เป็นส่วนใหญ่มีปริมาณของ SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 ตั้งแต่ร้อยละ 50 ถึงร้อยละ 70โดยน้ำหนักและปริมาณ CaO สูง โดยมีคุณสมบัติตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังในตารางที่ 2.2 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย

นอกจากจะแบ่งแยกชนิดของเถ้าถ่านออกเป็น 2 ชนิดดังกล่าวมา ยังสามารถพิจารณาจากความแตกต่างของส่วนประกอบและคุณสมบัติในด้านความเป็นซีเมนต์ (Cementitious) และความเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) ได้ด้วย เนื่องจากเถ้าลอย Class C โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์เพิ่มขึ้น จากคุณสมบัติปอซโซลาน เพราะเถ้าลอย Class C มักจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าร้อยละ 10 ส่วน Class F มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 10 ดังนั้นการนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีตธรรมดาทั่วไป ACI 226 (1987) ได้แนะนำว่า ควรใช้เถ้าลอย Class F ในปริมาณร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และสามารถเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15 ถึง 35 ได้ในกรณีที่ใช้เถ้าลอย Class C เนื่องจากพบว่า เถ้าลอย Class C จะมีลักษณะความเป็นซีเมนต์มากกว่า เพราะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ สูงกว่าเถ้าลอย Class F

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด F	ชนิด C
1. ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์ (SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3) อย่างต่ำ ร้อยละ	70.0	50.0
2. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างสูง ร้อยละ	5.0	5.0
3. ปริมาณความชื้นสูงสุด ร้อยละ	3.0	3.0
4. การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง ร้อยละ	6.0	6.0
5. ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na_2O ร้อยละ	1.5	1.5

สำหรับในประเทศไทยได้แบ่งชั้นคุณภาพและชนิดของเถ้าลอยตามคุณลักษณะทางเคมีและคุณลักษณะทางฟิสิกส์ได้เป็น 3 ชั้น คุณภาพตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 2135 - 2545 ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3124 (พ.ศ. 2546) ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511 เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต ดังนี้คือ

1) ชั้นคุณภาพ 1 ใช้สำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการคุณภาพดีเป็นพิเศษ

2) ชั้นคุณภาพ 2 ใช้สำหรับคอนกรีตทั่วๆไป แบ่งออกเป็น 2 ชนิด

- ชนิด ก
- ชนิด ข

3) ชั้นคุณภาพ 3ใช้สำหรับงานที่ต้องการกำลังอัดไม่สูง เช่น งานสำหรับคอนกรีตเขื่อน งานคอนกรีตหยาบ

ซึ่งคุณลักษณะทั้งทางเคมีและคุณลักษณะทางฟิสิกส์นั้นมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดคุณลักษณะทางเคมีของเถ้าลอย ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 2135-2545

ลำดับ	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด (หน่วยเป็นร้อยละ)			
		ชั้น	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้น
		คุณภาพ 1	ชนิด ก	ชนิด ข	คุณภาพ 3
1	ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ไม่น้อยกว่า	30.0	30.0	30.0	30.0
2	แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	-	น้อยกว่า 10.0	ไม่น้อยกว่า 10.0	-
3	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ไม่เกิน	5.0	5.0	5.0	3.0
4	ปริมาณความชื้น ไม่เกิน	3.0	3.0	2.0	3.0
5	น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผาไม่เกิน	6.0[1)]	6.0[1)]	6.0[1)]	12.0

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดคุณลักษณะทางเคมีของเถ้าลอย ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 2135-2545 (เพิ่มเติม)

ลำดับ	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด (หน่วยเป็นร้อยละ)			
		ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้นคุณภาพ 3
			ชนิด ก	ชนิด ข	
1	ปริมาณแอลคาไล (Na_2O+ 0.658K_2O)[1] ไม่เกิน				
	- เมื่อมีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เกินร้อยละ 3.0 แต่ไม่เกินร้อยละ 5.0	1.5	1.5	1.5	1.5
	- เมื่อมีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ไม่เกินร้อยละ 3.0	4.0	4.0	4.0	4.0

หมายเหตุ [1] เถ้าลอยที่มีค่าร้อยละของปริมาณแอลคาไลเกินเกณฑ์ที่กำหนด อาจนำมาใช้กับมวลรวมที่ไวต่อการทำปฏิกิริยากับแอลคาไล (Alkali-Aggregate Reaction) ได้ หากผลการทดสอบรายการประสิทธิผลในการควบคุมปฏิกิริยาแอลคาไล - ซิลิกาเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดคุณลักษณะทางฟิสิกส์ของเถ้าลอย ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 2135 - 2545

ลำดับ	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด(หน่วยเป็นร้อยละ)			
		ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้นคุณภาพ 3
			ชนิด ก	ชนิด ข	
1	- ความละเอียดปริมาณที่ค้างบนแร่ง 45 ไมโครเมตร โดยร่อนแบบเปียก ร้อยละไม่เกิน	10	50	55	65
	- หรือ พื้นที่ผิวจำเพาะ ทดสอบด้วยเครื่องเบลนแอร์เพอร์มีอะบิลิตี (Blaine Air Permeability Apparatus) ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ไม่น้อยกว่า	6000	2300	2000	1600
2	ดัชนีกำลัง เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1[1] ร้อยละไม่น้อยกว่า				
	อายุ 7 วัน หรือ	85	70	70	60
	อายุ 28 วัน หรือ	95	75	75	70
	อายุ 91 วัน[2]	100	85	85	75

ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดคุณลักษณะทางฟิสิกส์ของเถ้าลอย ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 2135 - 2545 (ต่อ)

ลำดับ	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด(หน่วยเป็นร้อยละ)			
		ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้นคุณภาพ 3
			ชนิด ก	ชนิด ข	
3	ปริมาณน้ำที่ต้องการ (เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) ร้อยละไม่เกิน	102	105	105	108
4	การคงตัว (Soundness)[3] การขยายตัวหรือหดตัวโดยวิธีใช้หม้อนึ่งอัดไอน้ำ(Autoclave) ร้อยละไม่เกิน	0.8	0.8	0.8	0.8

หมายเหตุ [1] ดัชนีกำลังเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Strength Activity Index Portland Cement Type1) มิใช่เกณฑ์กำหนดสำหรับความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยนี้ นอกจากนั้น ปริมาณของเถ้าลอยที่กำหนดให้ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักในการทดสอบนี้ก็ไม่ใช่สัดส่วนการผสมซึ่งแนะนำสำหรับการใช้จริงในงานคอนกรีต ปริมาณสัดส่วนที่เหมาะสมของเถ้าลอยซึ่งจะใช้ทดแทนปูนซีเมนต์สำหรับงานโครงการก่อสร้างจริงจะต้องมีการออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อให้ได้คุณสมบัติของคอนกรีตที่ต้องการในแต่ละงาน การทดสอบนี้เป็นเพียงเกณฑ์ซึ่งวัดระดับของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่กำหนดเท่านั้น ซึ่งค่านี้อาจเปลี่ยนแปลงไปได้ตามแหล่งกำเนิดของเถ้าลอยและประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

[2] ถ้าการทดสอบดัชนีกำลังเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุ 7 วัน หรือ 28 วัน ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด อาจใช้ดัชนีกำลังเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุ 91 วัน เป็นเกณฑ์ตัดสินได้

[3] ในกรณีที่ออกแบบสัดส่วนผสมโดยให้มีปริมาณเถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์มากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ให้เตรียมชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบการขยายตัวโดยวิธีหม้อนึ่งอัดไอในสัดส่วนเดียวกัน

ตารางที่ 2.6 ข้อกำหนดคุณลักษณะทางฟิสิกส์ของเถ้าลอย ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 2135 - 2545 (เพิ่มเติม)

ลำดับ	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด(หน่วยเป็นร้อยละ)			
		ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้นคุณภาพ 3
			ชนิด ก	ชนิด ข	
1	ตัวประกอบพหุคูณ (ผลคูณของน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผากับความละเอียด (ปริมาณที่ค้างบนแร่ง 45 ไมโครเมตร โดยร่อนแบบเปียก)[1]) ร้อยละไม่เกิน	225	225	225	225
2	การหดตัวแห้งที่เพิ่มขึ้นของแท่งมอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วัน (ค่าแตกต่างของค่าการหดตัวแห้งของแท่งมอร์ต้าร์ทดสอบที่อายุ 28 วัน กับแท่งมอร์ต้าร์ควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเดียวกัน) ร้อยละไม่เกิน	0.03	0.03	0.03	0.03
3	ความสม่ำเสมอของคอนกรีตกักกระจายฟองอากาศ (ปริมาณสารกักกระจายฟองอากาศที่ใช้เพื่อให้ปริมาณฟองอากาศร้อยละ 18.0 โดยปริมาตรของมอร์ต้าร์ ผลที่ได้จากการทดสอบไม่เกิน 10 ครั้งค่าที่วัดได้แต่ละค่าจะแตกต่างจากค่าเฉลี่ยได้) ร้อยละไม่เกิน	20	20	20	20
4	ประสิทธิผลในการควบคุมประมาณแอลคาไล-ซิลิกา[2] (การขยายตัวของมอร์ต้าร์ทดสอบที่อายุ 14 วัน เทียบเป็นร้อยละของการขยายตัวของมอร์ต้าร์ควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์แอลคาไลต่ำที่อายุเดียวกัน) ร้อยละไม่เกิน	100	100	100	100

ตารางที่ 2.6 ข้อกำหนดคุณลักษณะทางฟิสิกส์ของเถ้าลอย ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 2135 - 2545 (เพิ่มเติม) (ต่อ)

ลำดับ	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด(หน่วยเป็นร้อยละ)			
		ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้นคุณภาพ 3
			ชนิด ก	ชนิด ข	
5	ประสิทธิผลการทนซัลเฟต[3)] วิธีการ A การขยายตัวของชิ้นตัวอย่างทดสอบเมื่อสัมผัสกับซัลเฟตเป็นเวลา 6 เดือน ร้อยละไม่เกิน				
	- สัมผัสกับซัลเฟตระดับปานกลาง	0.10	0.10	0.10	0.10
	- สัมผัสกับซัลเฟตระดับสูง	0.05	0.05	0.05	0.05
	วิธีการ B การขยายตัวของชิ้นตัวอย่างทดสอบเมื่อสัมผัสกับซัลเฟตเป็นเวลา 6 เดือน เปรียบเทียบกับการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟต ร้อยละไม่เกิน	100	100	100	100
6	ความสม่ำเสมอ - ความหนาแน่น ผลที่ได้จากการทดสอบ 5 – 10 ครั้ง ค่าที่วัดได้แต่ละค่าจะแตกต่างจากค่าเฉลี่ยได้ร้อยละไม่เกิน	5	5	5	5
	- หรือ ความละเอียด ปริมาณที่ค้างบนแร่ง 45 ไมโครเมตร โดยร่อนแบบเปียก ผลที่ได้จากการทดสอบ 5 -10 ครั้ง ค่าที่วัดได้แต่ละค่าจะแตกต่างจากค่าเฉลี่ยได้ร้อยละไม่เกิน	5	5	5	5
	- หรือความละเอียด พื้นที่ผิวจำเพาะ ทดสอบด้วยเครื่องเบลนแอร์เพอร์มีอะบิลิตี ผลที่ได้จากการทดสอบ 5 – 10 ครั้ง ค่าที่วัดได้แต่ละค่าจะแตกต่างจากค่าเฉลี่ยได้ ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ไม่เกิน	450	450	450	450

หมายเหตุ [1)] ใช้กับกรณีของคอนกรีตที่ต้องการความทนทานความเสียหายเนื่องจากการแข็งตัวและการหลอมเหลวของน้ำสลับกัน (Freezing and Thawing)

[2] เถ้าลอยที่เป็นไปตามข้อกำหนดนี้จะมีประสิทธิผลในการควบคุมปฏิกิริยาเคมีระหว่างมวลรวมกับแอลคาไล เช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์แอลคาไลต่ำควบคุมในการทดสอบ อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าลอยจะได้ผลดี เมื่อเถ้าลอยที่ใช้มีปริมาณที่ไม่น้อยกว่าเถ้าลอยที่ใช้ในการทดสอบนี้ และเมื่อปริมาณแอลคาไลในปูนซีเมนต์ที่ใช้งานจริงมีค่าไม่เกินร้อยละ 0.05 ของปริมาณแอลคาไลที่มีในปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบนี้

[3] ในการใช้งานจริงอาจจะยอมให้ส่วนผสมของคอนกรีตมีปริมาณเถ้าลอยแตกต่างจากปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ทดสอบไม่เกินร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของปริมาณวัสดุประสาน โดยที่ปูนซีเมนต์ที่ใช้งานจริงต้องมีปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3CaO{\cdot}Al_2O_3$) ไม่เกินปริมาณที่มีในปูนซีเมนต์ทดสอบ

2.4.2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คือประกอบด้วย SiO_2, Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักและมี MgO, Na_2O, K_2O และ SO_3 เป็นองค์ประกอบรอง ดังแสดงในตารางที่ 2.3 นอกจากนี้ยังประกอบด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition: LOI) เถ้าลอยมี SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักเนื่องจากรวมกันแล้วมีปริมาณถึงร้อยละ 80 - 90 ดังนั้นจึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของถ่านหินมาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ ของเถ้าลอยไว้อย่างต่ำร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้งานได้

2.4.3 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

1) ลักษณะของอนุภาคและรูปร่างของเถ้าลอยแตกต่างกันไปตามชนิดของถ่านหินที่เผา อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา สภาพในการเผาและวิธีการเก็บเถ้าลอย โดยรูปร่างของเถ้าลอยจะเป็นส่วนประกอบของแก้ว (Glassy) มีลักษณะกลมหรือกลวงโดยที่ทรงกลมกลวงจะเรียกว่า Cenospheres ส่วนทรงกลมที่ประกอบด้วยทรงกลมเล็กหลายอันรวมกันจะเรียกว่า Peripheries

2) ค่าความละเอียด โดยทั่วไปเถ้าลอยจะมีขนาดตั้งแต่ 1 ไมโครเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร ค่าความละเอียดของเถ้าลอยจะวัดได้จากปริมาณผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐาน (Sieve Analysis) โดยทั่วไปปริมาณของเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงขนาด 80 ไมโครเมตร มีปริมาณร้อยละ6 ถึงร้อยละ 25 โดยน้ำหนักปริมาณเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงขนาด 50 ไมโครเมตร มีปริมาณร้อยละ 16 ถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนักและค้างบนตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร มีปริมาณร้อยละ 3 ถึงร้อยละ 14 โดยน้ำหนักค่าความละเอียดจะมีผลอย่างมากต่อคุณภาพของคอนกรีต นั่นคือเถ้าลอยที่มีความละเอียดมากจะทำให้คอนกรีตมีความสามารถต้านทานแรงอัดสูงขึ้น

3) ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเถ้าลอยที่ได้จากการเก็บโดยเครื่องมือดักจับ (Electrostatic Precipitators) จะมีความละเอียดอยู่ในช่วง 4,000 ถึง 7,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม แต่เครื่องมือดักจับสมัยใหม่สามารถดักจับเถ้าลอยที่มีความละเอียดได้ถึง 12,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม โดยทั่วไปค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสามารถหาได้จากเครื่องมือทดสอบหาความซึมอากาศเบลน (Blaine Air Permeability Apparatus) โดยความละเอียดของเถ้าลอยจากวิธีนี้อยู่ในช่วง 2,500 ถึง 5,500 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม เมื่อเทียบค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากจะมีพื้นผิวมาก ส่งผลให้สามารถทำปฏิกิริยาต่างๆ ได้เร็วกว่าเถ้าลอยที่มีความละเอียดน้อยกว่า

4) ความถ่วงจำเพาะ เถ้าลอยปกติแล้วจะค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.2 ถึง 2.8 แต่อนุภาคที่มีลักษณะกลมและกลวง (Cenosheres) จะมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1.0 จึงสามารถลอยน้ำได้เถ้าลอยที่มีปริมาณเหล็กสูงจะมีค่าความถ่วงจำเพาะแนวโน้มที่สูง แต่ถ้ามีปริมาณคาร์บอนสูงค่าความถ่วงจำเพาะจะมีแนวโน้มลดลง

5) สีของเถ้าลอยสีของเถ้าลอยจะขึ้นอยู่กับปริมาณของ Fe_2O_3 และปริมาณคาร์บอน โดยเถ้าลอยมีปริมาณคาร์บอนสูงจะมีสีดำและเทา ส่วนเถ้าลอยที่มีปริมาณ Fe_2O_3 สูงจะมีสีน้ำตาล

อย่างไรก็ตามเถ้าลอยในประเทศไทยสามารถพบได้ทั้ง Class C และ Class F ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา และลักษณะการเผาถ่านหิน อย่างไรก็ดีต่างก็มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีต เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย มีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 2.7 ส่วนตารางที่ 2.8 แสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีจากแหล่งต่างๆ

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2528 – 2544 [2]

ปี พ.ศ.	องค์ประกอบทางเคมี, %								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	LOI
2528	12.0	5.9	17.3	39.5	4.6	2.0	0.8	11.5	6.3
2533	37.8	20.5	14.2	17.4	3.3	0.9	2.1	3.9	0.8
2535	40.3	24.0	15.0	11.2	2.8	1.0	2.6	3.1	0.5
2540	41.5	28.1	12.3	10.0	1.2	0.6	3.3	2.0	0.8
2544	39.9	18.2	13.6	17.2	2.4	1.3	2.7	1.5	0.1

ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ [10]

ตัวอย่างเถ้าลอย	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	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

2.4.4 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เถ้าลอยทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต กล่าวคือเมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในเถ้าลอย เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน โดยทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้นและเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุระหว่าง 7-14 วันและมีปฏิกิริยาไปเรื่อยๆ นอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นได้เร็วขึ้นเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิคอนไดออกไซด์(SiO_2) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นดังสมการที่ 2.8

$$3Ca(OH)_2+2SiO_2 \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O \text{ หรือ (CSH)} \qquad (2.8)$$

และในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นดังสมการที่ 2.9

$$3Ca(OH)_2+2Al_2O_33CaO \longrightarrow 2Al_2.O_3.3H_2O \text{ หรือ (CAH)} \qquad (2.9)$$

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นการศึกษางานวิจัยที่ผ่านซึ่งศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ เพื่อความต้านทานสารละลายซัลเฟตของคอนกรีตผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย

P. Chindaprasirt, P. Kanchanda, A. Sathonsaowaphak และ H.T. Cao (2548) [11]ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมปอซโซลาน (เถ้าลอยชนิด F และเถ้าแกลบ) ใช้อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ตัวอย่างที่ใช้วัดการขยายตัวจะถูกแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 และทำการตรวจสอบค่า pH ของสารละลาย จากการศึกษาพบว่าเถ้าลอยและเถ้าแกลบช่วยลดการขยายตัวของมอร์ต้าร์ และค่า pH นอกจากนี้ยังพบว่าเถ้าแกลบมีประสิทธิภาพมากกว่าเถ้าลอย จากผลการทดสอบ SEM ที่ผิวตัวอย่างที่แตกร้าวหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตชี้ให้เห็นว่าการทำลายโดยซัลเฟตของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอย หรือเถ้าแกลบถูกยับยั้งโดยการลดแคลเซียมออกไซด์ และอัตราส่วน C/S ของ CSH เจล เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าซีเมนต์ล้วนพบว่ามอร์ต้าซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบมีแคลเซียมซัลเฟตน้อยกว่าและเกิดแอททริงไจท์น้อยกว่าอย่างชัดเจน เช่นเดียวกันกับในกรณีมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยก็จะน้อยกว่ามอร์ต้าร์ซีเมนต์ล้วน แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีมากกว่ามอร์ต้าซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยปอซโซลานทั้งสองชนิดนี้ในอัตราการแทนที่ถึงร้อยละ 40 เพื่อสร้างซีเมนต์ผสมที่มีความต้านทานซัลเฟตดี

Pitisan Krammart and Somnuk Tangtermsirikul (2004) [9] ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แตกต่างกันสองระดับคือร้อยละ 8.28 และร้อยละ 17.28 จากการศึกษาพบว่าการขยายตัวเมื่อแช่ทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต รวมทั้งการลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 ให้ค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบมอร์ต้ารปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้ค่าสูงกว่าในทางกลับกันมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 ส่งผลให้การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักแย่ลงกว่าเดิม แต่จะช่วยให้ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตทั้งสองชนิดลดลง การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 จะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่

เพิ่มขึ้น การใช้เถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่การลดลงจะไม่มีผลกระทบเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 นอกจากนี้ยังพบว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ค่าการขยายตัว ค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัด และค่าการสูญเสียน้ำหนักจะเป็นสัดส่วนกัน อย่างไรก็ตามในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีเพียงค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนักที่เป็นสัดส่วนกัน แต่การขยายตัวจะมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนัก

ปิติศานต์ กร้ำมาตร และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล (2550) [1]ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ ที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยบางส่วนโดยการวัดการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักตัวอย่างถูกแช่ในสารละลายซัลเฟต จากการศึกษาพบว่าทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตการขยายตัวของมอร์ต้าร์แทนที่ฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 68 สัปดาห์ ทุกส่วนผสมยังไม่มีการสูญเสียน้ำหนัก ในขณะที่การแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 ล้วน แต่ในกรณีมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 ล้วน

Al- Moudi O.S.B. et al. (1999) [12] ได้ศึกษาการขยายตัวและการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 โดยนำปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมซิลิกาฟูม และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก พบว่าการสูญเสียกำลังอัดในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่ามากกว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เมื่อเปรียบเทียบค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ปรากฏว่ามีค่ามากกว่าการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ดังนั้นจึงให้ความสำคัญต่อการสูญเสียกำลังอัดในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมซิลิกาฟูมให้ผลดีที่สุดในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แต่ไม่แนะนำให้ใช้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

P.Pipilikaki, M.Katsioti และ J.L.Gallias (2008) [13] ได้ศึกษาความสามารถการต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในสภาวะที่สารละลายซัลเฟตมีความเข้มข้นสูง โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนที่มีขนาดความละเอียดเบลน (Blaine) 2550 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนทีมีขนาดความละเอียดเบลน 3990 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ในปริมาณร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 และอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 3โดยหล่อแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 4×4×16 เซนติเมตร ตามมาตรฐานยุโรป (European Standard EN 196-1) ทั้งนี้ได้นำตัวอย่างตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังกล่าวแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิห้อง 20 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1.5 ปี และทำการวัดค่าการเสื่อมสภาพของตัวอย่างมอร์ต้าร์จนครบอายุ 500 วัน โดยทำการวัดค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์และวัดการสูญเสียกำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อายุต่างๆ จากการศึกษาพบว่าการขยายตัวแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนร้อยละ 35 โดยน้ำหนักนั้นมีค่าการขยายตัวมากกว่าแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนโดยเริ่มมีการขยายตัวมากกว่าอย่างชัดเจนหลังจาก 250 วันเป็นต้นไป นับจากวันแช่ตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และเริ่มเห็นรอยแตกร้าวที่อายุที่อายุ 6 เดือน ส่วนการสูญเสียกำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ต้าร์นั้นพบว่ามีความสอดคล้องกันกับกล่าวคือ การสูญเสียกำลังอัดประลัยของตัวแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก นั้นมีค่าการสูญเสียกำลังอัดประลัยมากกว่าแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินปูนถึงร้อยละ 35 นั้นเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงและอาจเป็นปริมาณที่ไม่เหมาะสมมีผลทำให้เกิดความโพรงมากเป็นเหตุให้สารลายซัลเฟตเข้าไปทำลายตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนร้อยละ 35 โดยน้ำหนักได้มากขึ้น มีผลทำให้การเกิด Ettringite มีมากตามไปด้วยเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงเป็นที่ชัดเจนว่าการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน (การศึกษาครั้งนี้) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตรส่วนที่ไม่เหมาะสมนำไปสู่การมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันโดยสิ้นเชิงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน กับความสามารถในการต้านทานซัลเฟตที่สภาวะแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตสูงๆ

Kamile Tosun, Burak Felekoglu, Bulent Baradan และ I.Akin Altun (2009) [14] ได้ศึกษาผล กระทบของอัตราการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับการต้านทานซัลเฟตที่ความเข้มข้นของสารละลายที่สูงโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1และประเภทที่ 3 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนในปริมาณร้อยละ 5, 10, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก

และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนในปริมาณร้อยละ 5, 10, 20 และ 40 โดยน้ำหนักที่อัตราส่วนผสม ซีเมนต์ / ทราย / น้ำ เท่ากับ 1/3/0.5 ตามมาตรฐาน BSEN 197 [1] โดยหล่อแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร และแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 25×25×285 มิลลิเมตร ทั้งนี้ได้นำตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังกล่าวแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่อุณหภูมิ ห้อง 5° และ 20°องศาเซลเซียส กับแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ที่อุณหภูมิห้อง 5°องศาเซลเซียส ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตสูง (200 กรัมต่อลิตร.) ที่ระยะเวลา 1 ปี โดยการทดสอบการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดประลัยและการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์จากการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วนการแทนฝุ่นหินปูนทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1และประเภทที่ 3 ที่ปริมาณสูงๆ (ร้อยละ 40) ที่อุณหภูมิต่ำๆ (5°องศาเซลเซียส) นั้นมีผลเสียต่อความต้านทานซัลเฟตในด้านกำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ต้าร์ไม่ว่าจะเป็นการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตแต่อย่างไรก็ตามในกรณีแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้นให้ค่าการสูญเสียกำลังอัดประลัยมากที่สุด ส่วนค่าการขยายตัวนั้นพบว่าการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 ที่ปริมาณสูงๆ (ร้อยละ 40) มีความสอดคล้องกันกับการสูญเสียกำลังอัดประลัย คือมีค่าการขยายตัวมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 ล้วนไม่ว่าเป็นการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่อุณหภูมิห้อง 5 และ 20°องศาเซลเซียส กับแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ก็ตาม

David G. Snelson และ John M. Kinuthia (2010) [15] ได้ศึกษาความสามารถของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่ไม่ได้คัดขนาดในการต้านทานซัลเฟต โดยใช้เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าทั้งนี้เพื่อนำเถ้าลอยดังกล่าวไปใช้ในการทดแทนซีเมนต์ในการก่อสร้างถนนเขื่อนและทางเดิน โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยที่ไม่ได้คัดขนาดในปริมาณร้อยละ 10 และ 40 โดยน้ำหนักที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:3 ตามมาตรฐาน BSEN 197 [1] โดยหล่อแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 20×20×160 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบการขยายตัวและแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ทรงกระบอกขนาด 100×200 มิลลิเมตรเพื่อทดสอบกำลังรับแรงดึง (Splitting Tensile Strength) ทั้งนี้ได้นำตัวอย่างตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังกล่าวแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่อายุ 504 วันจากการศึกษาพบว่าค่าการขยายตัวที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 นั้นมีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 40 นั้นมีค่าการขยายตัวน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ในส่วนของกำลังรับแรงดึงพบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยดังกล่าวในปริมาณที่สูงๆ (ร้อยละ 40) นั้นให้ค่า

กำลังรับแรงดึงน้อยกว่าการแทนที่น้อยๆ (ร้อยละ 10) ซึ่งพบว่ากำลังการรับแรงดึงของตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังกล่าวลดลงตามร้อยละของการแทนที่ในปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ไม่ได้คัดขนาดที่เพิ่มขึ้น

Thidar Aye และ Chiaki T. Oguchi (2010) [16] ได้ศึกษาความสามารถในการต้านทานซัลเฟตที่สภาวะรุนแรงของมอร์ต้าร์ซีเมนต์และมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสม โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25 และแทนที่ด้วยซิลิก้าฟูมร้อยละ 8 และแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 โดยหล่อแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 5×5×12 ทั้งนี้ได้นำตัวอย่างตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังกล่าวแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 และแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 ที่อุณหภูมิห้อง 20°C และทำการวัดค่าการเสื่อมสภาพของตัวอย่างมอร์ต้าร์จนครบอายุ 24 สัปดาห์ โดยทำการวัดค่าการสูญเสียกำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อายุต่างๆ จากการศึกษาพบว่าการสูญเสียกำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น ทุกการแทนที่มีค่าการสูญเสียกำลังอัดประลัยน้อยกว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25 มีค่าการสูญเสียกำลังอัดประลัยมากที่สุด รองลงมาเป็นการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร้อยละ 8และซิลิก้าฟูมร้อยละ 8 นั้นมีค่าการสูญเสียกำลังอัดประลัยน้อยที่สุด เช่นเดียวกันในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตพบว่าทุกการแทนที่นั้นมีค่าการสูญเสียกำลังอัดประลัยมากกว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ถูกแทนที่ด้วยซิลิก้าฟูมร้อยละ 8 กลับมีค่าการสูญเสียกำลังอัดประลัยมากที่สุด รองลงมาเป็นการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร้อยละ 8 และ เถ้าลอยร้อยละ 25 นั้นมีค่าการสูญเสียกำลังอัดประลัยน้อยที่สุด

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยจะกล่าวถึง วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย การเตรียมสารละลายซัลเฟต และสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการวิจัย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ฝุ่นหินปูน เถ้าลอย ทรายแม่น้ำ สารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งผลิตตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1

2) เถ้าลอย ใช้เถ้าลอย จากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

3) ฝุ่นหินปูน ใช้ฝุ่นหินปูนที่ได้รับการควบคุมคุณภาพในการผลิต มีสิ่งเจือปนน้อย และผลิตเพื่อจำหน่ายเป็นอุตสาหกรรม โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 4 ไมโครเมตร และ 14 ไมโครเมตร

4) ทราย ใช้ทรายน้ำจืด ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 โดยได้ทดสอบคุณสมบัติแล้ว คือมีความถ่วงจำเพาะ 2.60 และค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.29

5) สารซัลเฟต ที่ใช้ในการแช่ตัวอย่างมอร์ต้าร์ ได้แก่ สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วน (3:1)

6) น้ำ ใช้น้ำประปา

3.1.2 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

สำหรับเครื่องมืออุปกรณ์ที่สำคัญ ที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ มีดังนี้

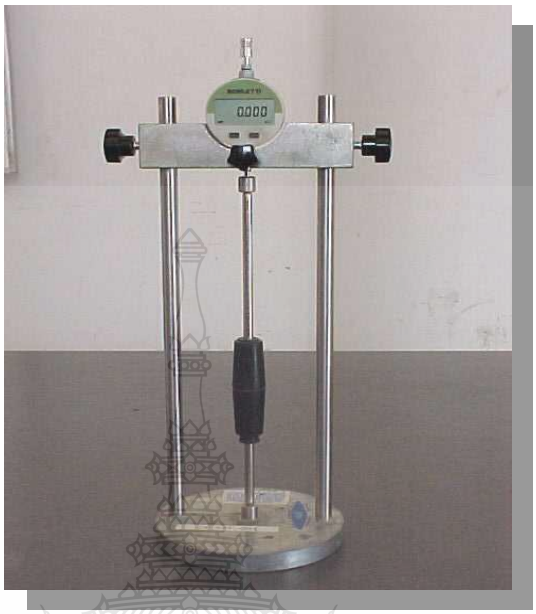
1) เครื่องผสมมอร์ต้าร์

ภาพที่ 3.1 เครื่องผสมมอร์ต้าร์

2) แบบหล่อชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์

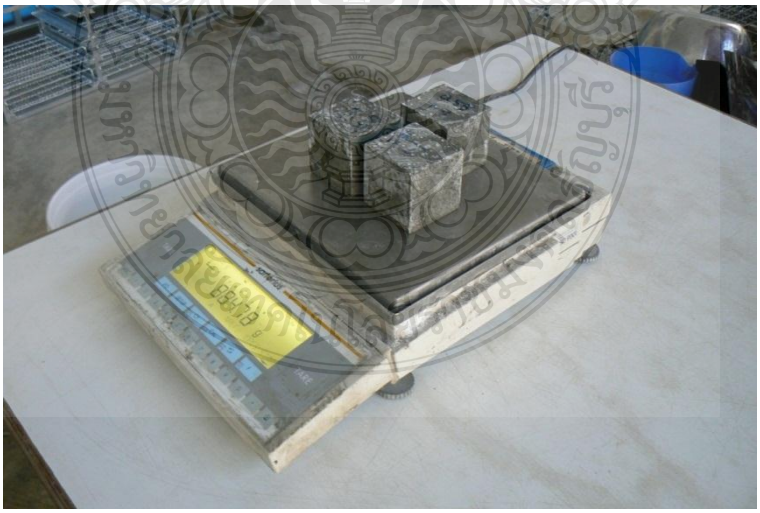
ภาพที่ 3.2 แบบหล่อชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์

3) เครื่องวัดความยาว (Length Comparator)



ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดความยาว

4) เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม



ภาพที่ 3.4 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม

5) ถังสำหรับแช่ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์

ภาพที่ 3.5 ถังสำหรับแช่ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์

3.2 ขอบเขตของการวิจัย

สำหรับขอบเขตของการวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่หนึ่งเป็นงานการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วยการวัดการขยายตัวและหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่เตรียมขึ้นมา โดยแช่ในสารละลายซัลเฟต ในขณะที่ขั้นตอนที่สองเป็นการเปรียบเทียบผลของการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังกล่าว แล้วเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต สำหรับขั้นตอนที่ 1 ซึ่งเป็นการทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ (ขนาด 2.5×2.5×28.5 เซนติเมตร) เพื่อหาค่าการขยายตัวกระทำตาม ASTM C1012 และเตรียมชิ้นตัวอย่างทดสอบหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ (ลูกบาศก์ขนาด 5×5×5 เซนติเมตร) โดยที่ตัวอย่างมอร์ต้าร์หลังจากหล่อลงแบบตัวอย่าง (Mold) แล้วหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อกันน้ำระเหยออกจากตัวอย่างและตัวอย่างจะถอดแบบที่อายุ 1 วัน แล้วนำไปแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (Saturated Lime Water) เป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายซัลเฟตที่เตรียมไว้ เพื่อทำการทดสอบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อายุต่างๆ สำหรับสารละลายซัลเฟตจะมีการเปลี่ยนที่อายุ 1, 2, 4 และทุกๆ 2 เดือนของการแช่ตัวอย่าง

3.2.2 การทดสอบตัวอย่าง

การวิจัยครั้งนี้จะประเมินการต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ โดยวัดการขยายตัวและหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟต

1) การวัดการขยายตัว

วิธีการวัดการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตกระทำตามมาตรฐาน ASTM C 1012 โดยหลังจากแช่ชิ้นตัวอย่างในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน ทำการวัดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดความยาว (length comparator) ตามมาตรฐาน ASTM C 490 ต่อจากนั้นนำตัวอย่างแยกแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต แล้วทำการวัดความยาวของชิ้นตัวอย่างที่อายุ 2, 3, 4, 8, 13 และ 16 สัปดาห์ของการแช่ในสารละลายซัลเฟต หลังจากนั้นให้ทำการวัดชิ้นตัวอย่างทุกๆ อายุ 2 เดือนของการแช่ในสารละลายซัลเฟต สำหรับการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างเป็นการเฉลี่ยการขยายตัว 3 ชิ้นตัวอย่าง สำหรับค่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์คำนวณจากสมการ (3.1)

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

โดยที่ L_i คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่างหลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน (มิลลิเมตร)

L_t คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของชิ้นตัวอย่าง ณ เวลาที่ต้องการวัดการขยายตัวหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตแล้ว (มิลลิเมตร)

3.2.3 การวัดการสูญเสียน้ำหนัก

เมื่อชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ (ขนาด 5×5×5 เซนติเมตร) แช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วันแล้ว ทำการวัดน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง ต่อจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างแยกแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคำนวณจากค่าเฉลี่ยของการสูญเสียน้ำหนักของ 3 ชิ้นตัวอย่าง สำหรับการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์คำนวณจากสมการ (3.2)

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

โดยที่ W_i คือน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างหลังแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน (กรัม)

W_t คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่าง ณ เวลาที่ต้องการวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตแล้ว (กรัม.)

สำหรับขั้นตอนที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบผลของการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์

โดยการเปรียบเทียบผลของการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ระหว่าง ชิ้นตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต ต่อจากนั้นเป็นการวิเคราะห์สรุปผลการทดลอง เพื่อเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

3.3 การเตรียมสารละลายซัลเฟต

สำหรับสารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้สารละลายซัลเฟต 3 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับสารละลายแมกนีเซียมในอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) สารละลายโซเดียมซัลเฟต ใช้โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เท่ากับ 50 กรัม (SO_4^{2-}เท่ากับ 33,800 ppm) ในสารละลาย 1 ลิตร

2) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเพื่อให้ปริมาณของ SO_4^{2-} เท่ากับ 33,800 ppm ดังนั้นจึงใช้แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) เท่ากับ 42.36 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร

3) สารละลายซัลเฟตที่ผสมกันระหว่างโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) กับแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) โดยใช้ในอัตราส่วนเท่ากับ 3:1 (โดยน้ำหนัก) โดยใช้โซเดียมซัลเฟต เท่ากับ 37.50 กรัม และแมกนีเซียมซัลเฟตเท่ากับ 10.59 กรัม ละลายในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ปริมาณอิออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) รวมแล้วเท่ากับ 33,800 ppm

โดยเตรียมสารละลายซัลเฟตไว้ล่วงหน้า 1 วัน ที่อุณภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส ก่อนแช่ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ และอัตราส่วนของปริมาตรสารละลายซัลเฟตต่อปริมาตรชิ้นตัวอย่างที่แช่ประมาณ

3.4 สัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการวิจัย

ตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการประเมินค่าการต้านทานซัลเฟต ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 และฝุ่นหินปูนซึ่งในที่นี้ใช้ 2 ชนิด คือ ฝุ่นหินปูนที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร และ 14 ไมโครเมตร และเถ้าลอย (Fly Ash) ของเถ้าถ่านหิน การศึกษาครั้งนี้ใช้สัดส่วนของวัสดุประสานดังนี้

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน

2) ฝุ่นหินปูน (แต่ละชนิด) จะใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ซึ่งแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

3) เถ้าลอยจะใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ซึ่งแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก

4) ฝุ่นหินปูน (แต่ละชนิด) จะใช้แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

5) ฝุ่นหินปูน (แต่ละชนิด) จะใช้แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

6) ฝุ่นหินปูน (แต่ละชนิด) จะใช้แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

7) ฝุ่นหินปูน (แต่ละชนิด) จะใช้แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 15 และแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

สำหรับตัวอย่างมอร์ต้าร์ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40 และ 0.55 โดยที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายของมอร์ต้าร์เท่ากับ 1:2.75 ตลอดการทดลอง รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการวิจัย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55

ลำดับ	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ประเภทที่		เถ้าลอย	ฝุ่นหินปูน		ทราย	น้ำ
		1	5		4 μm	14 μm		
1	C1-0.40	1.00	-	-	-	-	2.75	0.40
2	C1-5LP4-0.40	0.95	-	-	0.05	-	2.75	0.40
3	C1-5LP14-0.40	0.95	-	-	-	0.05	2.75	0.40
4	C1-10LP4-0.40	0.90	-	-	0.10	-	2.75	0.40
5	C1-10LP14-0.40	0.90	-	-	-	0.10	2.75	0.40
6	C1-20FA-0.40	0.80	-	0.20	-	-	2.75	0.40
7	C1-40FA-0.40	0.60	-	0.40	-	-	2.75	0.40
8	C1-15FA -5LP4-0.40	0.80	-	0.15	0.05	-	2.75	0.40

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการวิจัย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 (ต่อ)

ลำดับ	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ประเภทที่		เถ้าลอย	ฝุ่นหินปูน		ทราย	น้ำ
		1	5		4 μm	14 μm		
9	C1-10FA -10LP4-0.40	0.80	-	0.10	0.10	-	2.75	0.40
10	C1-30FA -10LP4-0.40	0.60	-	0.30	0.10	-	2.75	0.40
11	C1-25FA -15LP4-0.40	0.60	-	0.25	0.15	-	2.75	0.40
12	C1-15FA -5LP14-0.40	0.80	-	0.15	-	0.05	2.75	0.40
13	C1-10FA -10LP14-0.40	0.80	-	0.10	-	0.10	2.75	0.40
14	C1-30FA -10LP14-0.40	0.60	-	0.30	-	0.10	2.75	0.40
15	C1-25FA -15LP14-0.40	0.60	-	0.25	-	0.15	2.75	0.40
16	C5-0. 0.40	-	1.00	-	-	-	2.75	0.40
17	C5-5LP4-0.40	-	0.95	-	0.05	-	2.75	0.40
18	C5-5LP14-0.40	-	0.95	-	-	0.05	2.75	0.40
19	C5-10LP4-0.40	-	0.90	-	0.10	-	2.75	0.40
20	C5-10LP14-0.40	-	0.90	-	-	0.10	2.75	0.40
21	C5-20FA-0.40	-	0.80	0.20	-	-	2.75	0.40
22	C5-40FA-0.40	-	0.60	0.40	-	-	2.75	0.40
23	C5-15FA -5LP4-0.40	-	0.80	0.15	0.05	-	2.75	0.40
24	C5-10FA -10LP4-0.40	-	0.80	0.10	0.10	-	2.75	0.40
25	C5-30FA -10LP4-0.40	-	0.60	0.30	0.10	-	2.75	0.40
26	C5-25FA -15LP4-0.40	-	0.60	0.25	0.15	-	2.75	0.40
27	C5-15FA -5LP14-0.40	-	0.80	0.15	-	0.05	2.75	0.40
28	C5-10FA -10LP14-0.40	-	0.80	0.10	-	0.10	2.75	0.40
29	C5-30FA -10LP14-0.40	-	0.60	0.30	-	0.10	2.75	0.40
30	C5-25FA -15LP14-0.40	-	0.60	0.25	-	0.15	2.75	0.40
31	C1-0.55	1.00	-	-	-	-	2.75	0.55
32	C1-5LP4-0.55	0.95	-	-	0.05	-	2.75	0.55

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการวิจัย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 (ต่อ)

ลำดับ	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ประเภทที่		เถ้าลอย	ฝุ่นหินปูน		ทราย	น้ำ
		1	5		4 μm	14 μm		
33	C1-5LP14-0.55	0.95	-	-	-	0.05	2.75	0.55
34	C1-10LP4-0.55	0.90	-	-	0.10	-	2.75	0.55
35	C1-10LP14-0.55	0.90	-	-	-	0.10	2.75	0.55
36	C1-20FA-0.55	0.80	-	0.20	-	-	2.75	0.55
37	C1-40FA-0.55	0.60	-	0.40	-	-	2.75	0.55
38	C1-15FA -5LP4-0.55	0.80	-	0.15	0.05	-	2.75	0.55
39	C1-10FA -10LP4-0.55	0.80	-	0.10	0.10	-	2.75	0.55
40	C1-30FA -10LP4-0.55	0.60	-	0.30	0.10	-	2.75	0.55
41	C1-25FA -15LP4-0.55	0.60	-	0.25	0.15	-	2.75	0.55
42	C1-15FA -5LP14-0.55	0.80	-	0.15	-	0.05	2.75	0.55
43	C1-10FA -10LP14-0.55	0.80	-	0.10	-	0.10	2.75	0.55
44	C1-30FA -10LP14-0.55	0.60	-	0.30	-	0.10	2.75	0.55
45	C1-25FA -15LP14-0.55	0.60	-	0.25	-	0.15	2.75	0.55
46	C5-0.55	-	1.00	-	-	-	2.75	0.55
47	C5-5LP4-0.55	-	0.95	-	0.05	-	2.75	0.55
48	C5-5LP14-0.55	-	0.95	-	-	0.05	2.75	0.55
49	C5-10LP4-0.55	-	0.90	-	0.10	-	2.75	0.55
50	C5-10LP14-0.55	-	0.90	-	-	0.10	2.75	0.55
51	C5-20FA-0.55	-	0.80	0.20	-	-	2.75	0.55
52	C5-40FA-0.55	-	0.60	0.40	-	-	2.75	0.55
53	C5-15FA -5LP4-0.55	-	0.80	0.15	0.05	-	2.75	0.55
54	C5-10FA -10LP4-0.55	-	0.80	0.10	0.10	-	2.75	0.55
55	C5-30FA -10LP4-0.55	-	0.60	0.30	0.10	-	2.75	0.55
56	C5-25FA -15LP4-0.55	-	0.60	0.25	0.15	-	2.75	0.55

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการวิจัย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 (ต่อ)

ลำดับ	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ประเภทที่		เถ้าลอย	ฝุ่นหินปูน		ทราย	น้ำ
		1	5		4 μm	14 μm		
57	C5-15FA -5LP14-0.55	-	0.80	0.15	-	0.05	2.75	0.55
58	C5-10FA -10LP14-0.55	-	0.80	0.10	-	0.10	2.75	0.55
59	C5-30FA -10LP14-0.55	-	0.60	0.30	-	0.10	2.75	0.55
60	C5-25FA -15LP14-0.55	-	0.60	0.25	-	0.15	2.75	0.55

หมายเหตุ อัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.1 เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแต่ละวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุประสานทั้งหมดในส่วนผสม

C1 หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

C5 หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

LP4 หมายถึง ฝุ่นหินปูนที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 4 ไมโครเมตร

LP14 หมายถึง ฝุ่นหินปูนที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 14 ไมโครเมตร

FA หมายถึง เถ้าลอยจากแหล่งโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

5LP4 หมายถึง แทนที่ฝุ่นหินปูนที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 4 ไมโครเมตรเป็นปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณวัสดุประสานทั้งหมด

5LP14 หมายถึง แทนที่ฝุ่นหินปูนที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 14 ไมโครเมตรปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณวัสดุประสานทั้งหมด

20FA หมายถึง แทนที่เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปางปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของปริมาณวัสดุประสานทั้งหมด

บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิเคราะห์

สำหรับผลการวิจัยและวิเคราะห์การต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน ในครั้งนี้ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยดังกล่าว จึงได้ศึกษาและทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นบางประการของวัสดุประสานที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ด้วย คุณสมบัติดังกล่าวที่ศึกษาได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี ส่วนในด้านการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน ได้ประเมินความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ใน 2 ลักษณะ คือ การขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ โดยในแต่ละการประเมินนั้นได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนดังนี้ ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน ผลกระทบจากความละเอียดของฝุ่นหินปูน ผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟต และผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ใช้ในการวิจัย

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร และเถ้าลอย โดยคุณสมบัติเบื้องต้นที่ได้ศึกษาในครั้งนี้ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาค และคุณสมบัติทางเคมี โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน

ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของวัสดุประสานที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้นั้น ได้แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกันคือ 3.15 และ 3.18 ตามลำดับ ส่วนฝุ่นหินปูนที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตรนั้น มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.70 และ 2.71 ตามลำดับ ในขณะที่เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.44

4.1.2 ความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสาน

สำหรับผลการทดสอบความความละเอียดโดยวิธีเบลน (Blaine's Fineness) ของวัสดุประสานที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้แสดงดังตารางที่ 4.1 คือของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าความละเอียดโดยวิธีเบลนเท่ากับ 3,190 และ 3,727 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ในขณะของฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร และ14 ไมโครเมตร เท่ากับ 9,260 และ ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตรนั้นมากกว่าของปูนซีเมนต์ประมาณ 3 เท่า ส่วนของเถ้าลอยที่ใช้มีค่าความละเอียดต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือมีค่าท่ากับ 2,460 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน และขนาดอนุภาคเฉลี่ย ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ฝุ่นหินปูน และเถ้าลอย ที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้

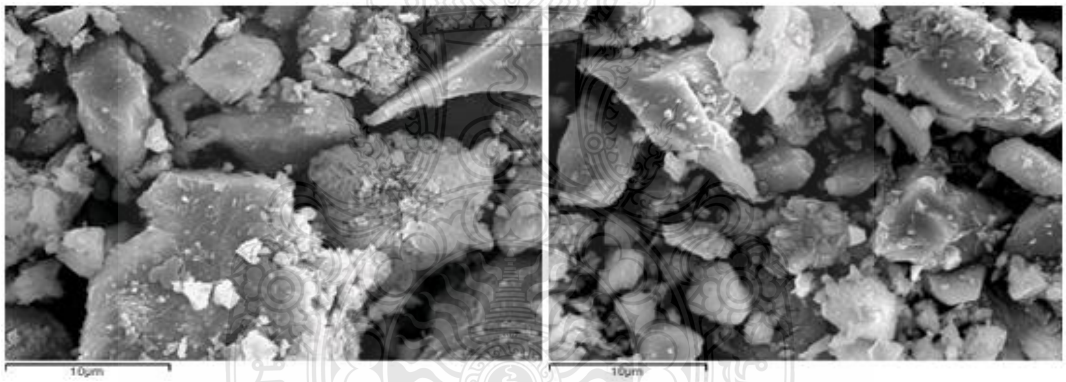
คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		ฝุ่นหินปูน		เถ้าลอย
	ประเภท 1	ประเภท 5	4 μm	14 μm	
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	3.18	2.70	2.71	2.44
ความละเอียด (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)	3,190	3,727	9,260	3,320	2,460
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	17.54	16.25	3.93	14.11	20.28

4.1.3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสาน

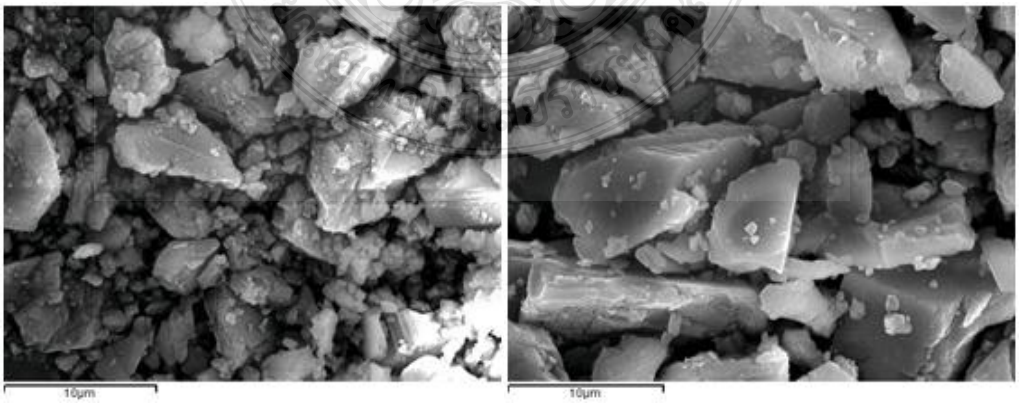
ในการถ่ายภาพขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสานในครั้งนี้ได้ใช้โดยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) แสดงดังภาพที่4.1 จากภาพถ่ายขยายขนาด 3,500 เท่าของอนุภาคของวัสดุประสานพบว่า อนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน คือจะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมกระจัดกระจายอยู่ทั่วๆ ไป ส่วนของฝุ่นหินปูนก็จะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมเช่นเดียวกับกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยที่ฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร นั้นจะมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าของปูนซีเมนต์ และเล็กกว่าของฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร ในขณะที่ลักษณะของอนุภาคของเถ้าลอยของแม่เมาะที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้จะมีลักษณะค่อนข้างกลมที่กระจัดกระจายอยู่ทั่วๆ ไปเช่นเดียวกัน

4.1.4 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน

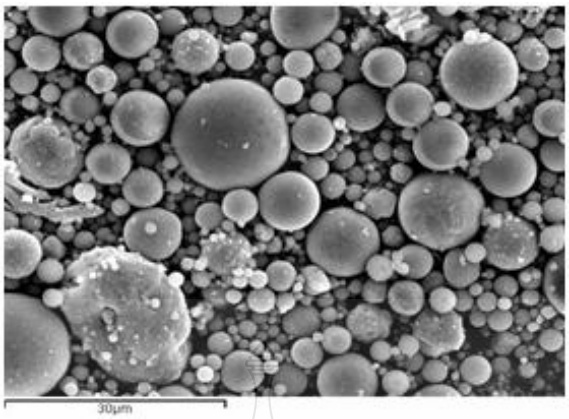
ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ ได้แสดงดังภาพที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า การกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้นั้นมีลักษณะการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกัน แต่จะมีของเถ้าลอยที่แนวโน้มจะมีอนุภาคส่วนที่หยาบมากกว่าวัสดุตัวอื่น กล่าวคือ กราฟส่วนสะสมที่ค้างตั้งแต่ร้อยละ 50 ขึ้นไปจะมีส่วนที่หยาบมากกว่าส่วนที่ละเอียด สำหรับค่าของขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ร้อยละค้างสะสมที่ 50) ของวัสดุประสานแต่ละชนิดเป็นดังนี้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 17.54 ไมโครเมตร ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เท่ากับ 16.25 ไมโครเมตร ในขณะที่ของฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร มีค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 3.93 และ 14.11 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งฝุ่นหินปูนความละเอียดขนาด 4 ไมโครเมตรมีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยค่อนข้างเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ ส่วนเถ้าลอยนั้นมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 20.28 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดที่ใหญ่กว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5



ก) ปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ประเภทที่ 1 ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

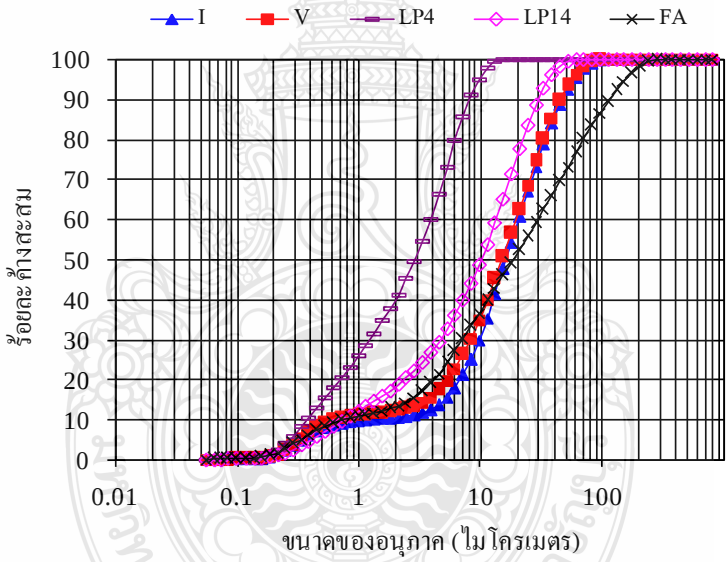


ค) ฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร ง) ฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย14 ไมโครเมตร



จ) เถ้าลอย

ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (ขนาด 3,500 เท่า)



ภาพที่ 4.2 ลักษณะการกระจายสะสมของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร และ เถ้าลอย ในเทอมของร้อยละค้างสะสม

4.1.5 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร

และ เถ้าลอย โดยใช้วิธี X - Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า SiO_2 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าเท่ากับร้อยละ 20.61 และร้อยละ 20.97 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในขณะที่ของฝุ่นหินปูนมีน้อยมากคือน้อยกว่าร้อยละ 1 แต่ของเถ้าลอยมีมากถึงร้อยละ 36.10 ส่วนปริมาณของ Al_2O_3 และ Fe_2O_3นั้นพบว่าของปูนซีเมนต์มีค่าประมาณร้อยละ 3-5 ส่วนของฝุ่นหินปูนไม่ถึงร้อยละ 1 แต่ของเถ้าลอยมีค่าเท่ากับร้อยละ 19.40 และ 15.10 ตามลำดับ ในส่วนปริมาณของ CaO นั้น ปรากฏว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 นั้น มีค่าเท่ากับร้อยละ 64.89 และ 62.86 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับของฝุ่นหินปูน (ร้อยละ 54.80 และ 54.30) ในขณะเถ้าลอยจากแม่เมาะที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้นั้นมีปริมาณ CaO เท่ากับร้อยละ 17.40 โดยน้ำหนัก

ในส่วนของออกไซด์รอง ซึ่งได้แก่ MgO, Na_2O, K_2O หรือ SO_3 ในวัสดุประสานแต่ละชนิดที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ ปรากฏว่ามีค่าค่อนข้างน้อยและมีในปริมาณที่ไม่แตกต่างกัน แต่สำหรับปริมาณของ LOI (การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา) พบว่าฝุ่นหินปูนนั้นมีค่าค่อนข้างสูงคือประมาณร้อยละ 43-44 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยนั้นน้อยมากคือ ประมาณร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนักเท่านั้น

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร และเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	**ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์**		**ฝุ่นหินปูน**		**เถ้าลอย**
	ประเภทที่ 1	**ประเภทที่ 5**	**4 µm**	**14 µm**	
Silicon Dioxide , SiO_2	20.61	20.97	0.06	0.27	36.10
Aluminum Oxide , Al_2O_3	5.03	3.49	0.09	0.18	19.40
Ferric Oxide , Fe_2O_3	3.03	4.34	0.04	0.08	15.10
Calcium Oxide , CaO	64.89	63.86	54.80	54.30	17.40
Magnesium Oxide , MgO	1.43	3.33	0.57	0.62	2.97
Sodium Oxide , Na_2O	0.22	0.12	-	-	-
Potassium Oxide , K_2O	0.46	0.47	-	-	-
Sulfur Trioxide , SO_3	2.70	2.12	-	-	0.77
Free Lime , CaO	0.79	1.01	-	-	-
Loss on Ignition, LOI	1.23	1.21	43.80	43.63	2.81

4.2 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต

ในการประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยการวัดการขยายตัว (Expansion) ของชิ้นตัวอย่างขนาด 2.5×2.5×28.5 เซนติเมตร ซึ่งได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน คือ ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน ผลกระทบจากความละเอียดของฝุ่นหินปูน ผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟต และผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

4.2.1 ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการขยายตัว

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการวิจัยของการศึกษาความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย (4 และ 14 ไมโครเมตร) โดยการแทนที่ฝุ่นหินปูน (แต่ละชนิด) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ซึ่งแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้าลอยจะใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก สำหรับการแทนที่ฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 นั้น เป็นดังนี้ คือฝุ่นหินปูน (แต่ละชนิด) แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 5 พร้อมทั้งแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 15 ถัดมาแทนที่ฝุ่นหินปูน (แต่ละชนิด) ในอัตราส่วนร้อยละ 10 พร้อมทั้งแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 10 และฝุ่นหินปูน (แต่ละชนิด) แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 พร้อมทั้งแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 สุดท้ายใช้ฝุ่นหินปูน (แต่ละชนิด) แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 15 พร้อมทั้งแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 25 (โดยทุกสัดส่วนของการแทนที่ใช้แทนที่โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) ทั้งนี้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40 และ 0.55 ในทุกสัดส่วนผสม

1) กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

1.1) วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) กรณีเมื่อวัสดุประสานมีการแทนที่ฝุ่นหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40 พบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เพราะปริมาณของ C_3A ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มีมากกว่าทำให้เกิด ยิปซั่มและ Ettringite มากกว่า ในขณะการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

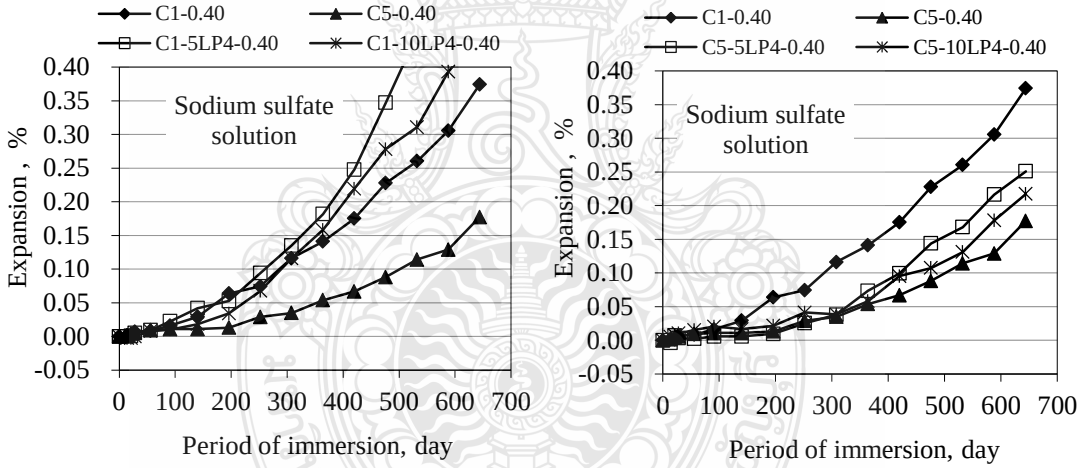
ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินร้อยละ 5 และร้อยละ 10 นั้นพบว่ามีค่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์มากกว่าค่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เพราะการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำๆ (0.40) นั้นจะทำให้ตัวอย่างมอร์ต้าร์มีความพรุน (Porosity) น้อย ประกอบกับการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนในปริมาณดังกล่าวเป็นการแทนที่และเติมเต็มช่องว่างภายในตัวอย่างมอร์ต้าร์ทำให้มีช่องว่างจำกัดสำหรับการขยายตัวเมื่อเกิด Ettringite เป็นผลให้การขยายตัวดังกล่าวเกิดการขยายตัวมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ในขณะการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินร้อยละ 5 และร้อยละ 10 มีค่าการขยายตัวมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เหตุผลเดียวกันของการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 กล่าวคือมีช่องว่างจำกัดสำหรับการขยายตัวเมื่อเกิด Ettringite แต่อย่างไรก็ตามการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนยังน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งมีปริมาณ C_3A น้อยจึงมีผลทำให้การขยายตัวมีค่าน้อย

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 พบว่าการขยายตัวของการแทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 มีค่ามากกว่าเมื่อแทนที่ร้อยละ 10 ทั้งนี้เพราะการแทนที่ร้อยละ 10 เป็นการลดปูนซีเมนต์ลงมากกว่าทำให้ปริมาณ C_3A น้อยกว่า

ภาพที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40 พบว่าให้ค่าการขยายตัวในแนวโน้มเดียวกันกับของฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร กล่าวคือการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำๆ (0.40) นั้นจะทำให้ตัวอย่างมอร์ต้าร์มีความพรุน (Porosity) น้อยจึงทำให้มีช่องว่างจำกัดสำหรับการขยายตัวของ Ettringite จึงทำให้การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการแทนที่ ส่วนการขยายตัวของตัวอย่างฝุ่นหินปูนที่แทนที่ร้อยละ 5 นั้น ยังมีค่ามากกว่าเมื่อแทนที่ด้วยร้อยละ 10 เช่นเดียวกันกับของฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร ซึ่งเหตุผลก็เป็นดังที่กล่าวมาแล้ว

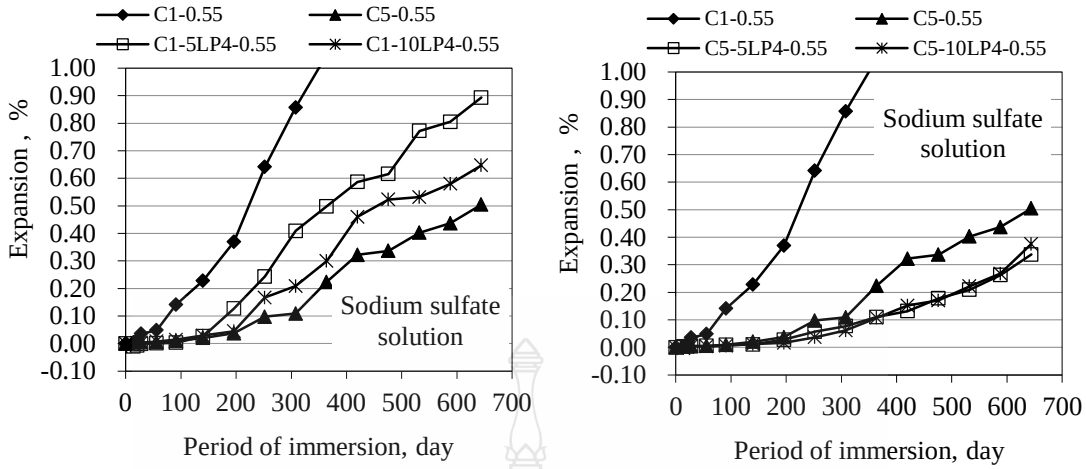
กรณีเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ดังภาพที่ 4.4 และ 4.6 พบว่าให้แนวโน้มในทิศทางเดียวกับกรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 กล่าวคือการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทที่ 5 ล้วน ในขณะที่ตัวอย่างมอร์ต้าร์ของฝุ่นหินปูนทั้งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร ที่แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นั้น ดังภาพที่ 4.4(ก) และ 4.6(ก) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่ยังมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และเมื่อแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 ยังให้ค่าการขยายตัวที่มากกว่าเมื่อแทนที่ร้อยละ 10 (ไม่ว่าจะเป็นฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 หรือ 14 ไมโครเมตร) ส่วนในกรณีเมื่อแทนที่ฝุ่นหินปูน (ทั้งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 นั้นพบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55) มีค่าน้อยกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ดังภาพที่ 4.4 (ข) และ4.6(ข)) ทั้งนี้เพราะการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ยิ่งเป็นการลดปริมาณ C_3A ลงทำให้เกิดยิปซั่มและ Ettringite น้อยลง และรวมทั้งฝุ่นหินปูนเข้าไปช่วยเติมเต็มช่องว่างในเพสต์จึงทำให้การเข้าทำลายของซัลเฟตได้ยากขึ้นจึงส่งผลให้การขยายตัวของมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูน (ทั้งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร) มีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน



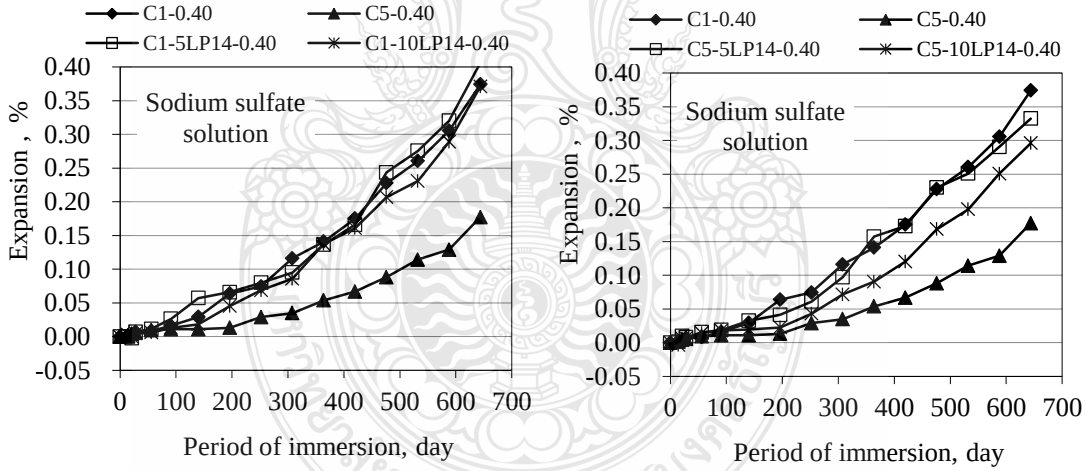
ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



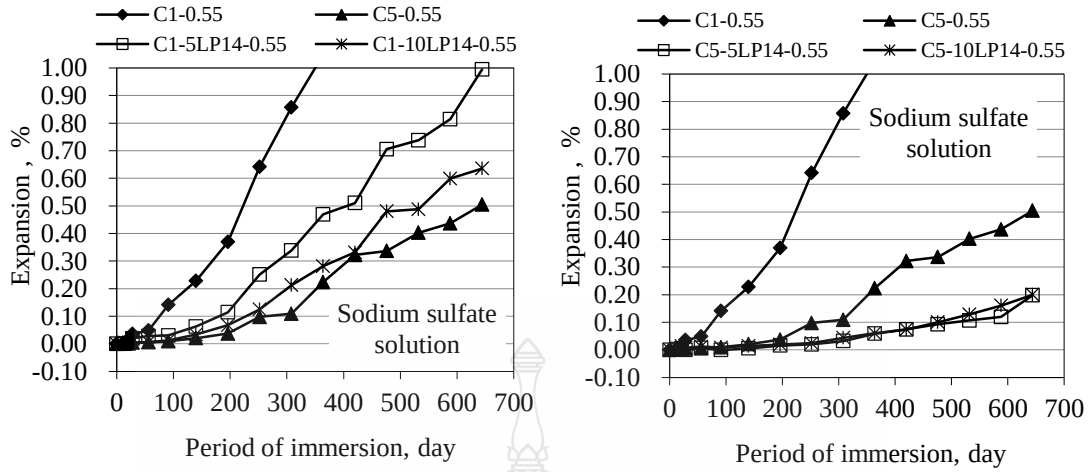
ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55



ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

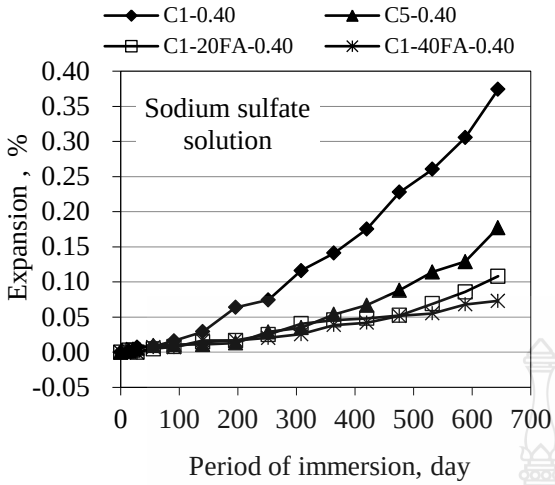


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

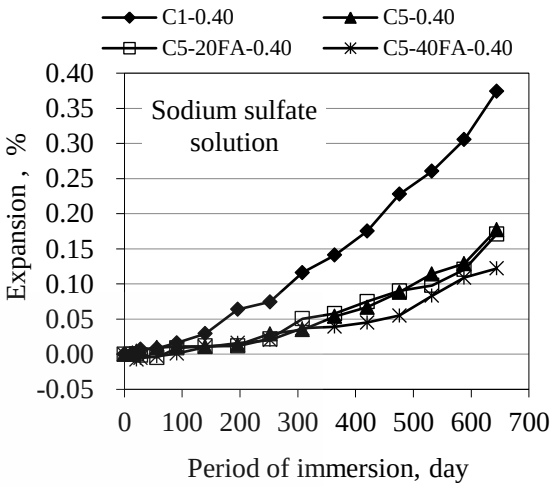
ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

1.2) วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) กรณีเมื่อวัสดุประสานมีการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.7 และ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 โดยการแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 และร้อยละ 40 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 พบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ของเถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 20 และ 40 แทนที่ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 และทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงและเถ้าลอยซึ่งเป็นสารปอซโซลานไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) ซึ่งเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงทำให้เกิดยิปซั่มและ Ettringite น้อยลงส่งผลให้การขยายตัวเกิดน้อยลง

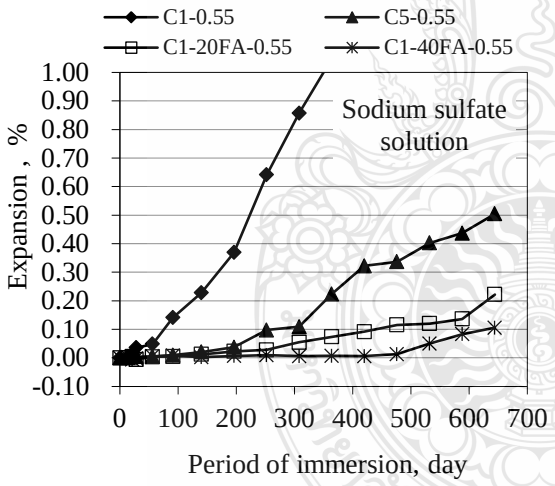


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

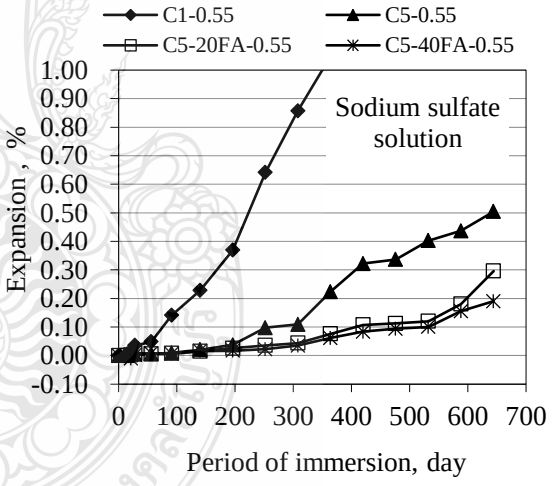


ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

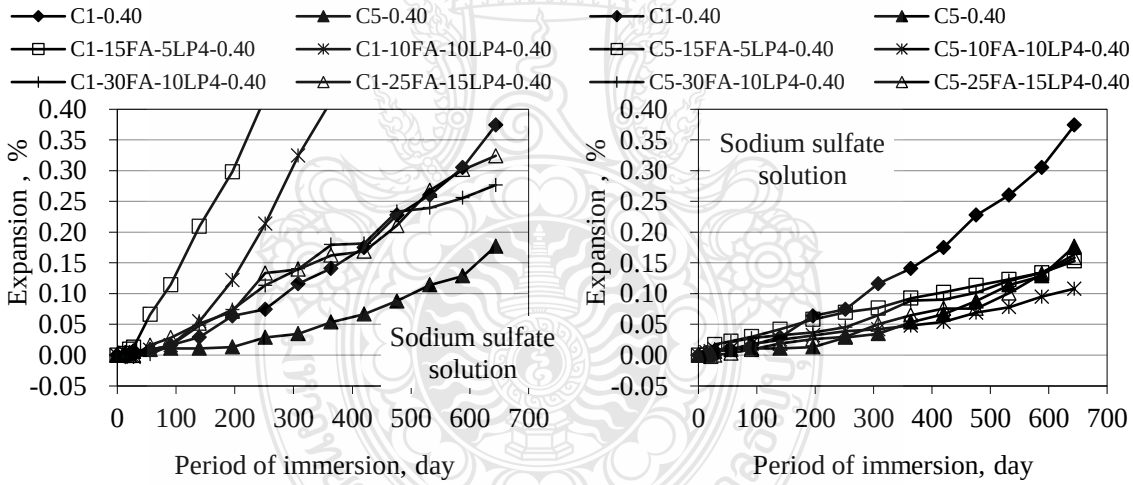
1.3) วัสดุประสานร่วมสามชนิด (Ternary) กรณีเมื่อวัสดุประสานมีการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.9(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนด้วยเถ้าลอยร่วมกับฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของตัวอย่างมอร์ต้าร์เท่ากับ 0.40 พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่ต่ำ ไม่ว่าจะแทนที่ร่วมกับฝุ่นหินปูนมากหรือน้อยจะให้ค่าการขยายตัวค่อนข้างสูงตัว (ตัวอย่าง C1-15FA-5LP4-0.040 และ C1-10FA-10LP4-0.40) คือสูงกว่าค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนค่อนข้างมาก แต่เมื่อแทนที่ปริมาณเถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้น (ตัวอย่าง C1-30FA-10LP4-0.40 และ C1-25FA-15LP4-0.40) กลับให้ค่าการขยายตัวน้อยลง ซึ่งน้อยกว่าของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนแต่ยังมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยมีปริมาณ CaO สูง (ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีปริมาณ CaO เท่ากับร้อยละ 17.40) เมื่อแทนที่ในปริมาณต่ำๆ จะให้ค่าการขยายตัวมาก แต่เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่สูงนั้นจะให้ค่าการขยายตัวน้อยลงซึ่งก็สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [1, 12] ทั้งนี้เพราะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่ต่ำผลของปฏิกิริยาปอซโซลานน้อยจึงลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ ได้น้อยรวมกับปริมาณ CaO ที่สูงของเถ้าลอยช่วยเพิ่ม $Ca(OH)_2$ ให้มากขึ้นด้วย แต่เมื่อแทนที่เถ้าลอยดังกล่าวในปริมาณที่สูงผลของปฏิกิริยาปอซโซลานมีค่ามาก จึงลดปริมาณของ $Ca(OH)_2$ ได้มาก นั่นแสดงว่าในกรณีที่กล่าวมาปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยมีผลมากกว่า

ภาพที่ 4.9(ข) เป็นกรณีเมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าลอยร่วมกับฝุ่นหินปูน (ขนาด 4 ไมโครเมตร) ซึ่งยังคงเป็นอัตรส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ผลของการศึกษาพบว่าแนวโน้มของการขยายตัวยังคงให้แนวโน้มเดียวกับของการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กล่าวคือการแทนที่ด้วยเถ้าลอยปริมาณต่ำๆยังมีแนวโน้มการขยายตัวมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 นั้น ส่งผลให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและสูงกว่าเล็กน้อยหรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ซึ่งเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้วรวมกับปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ต่ำนั้นเมื่อลดปูนซีเมนต์ลงจึงเป็นผลให้การขยายตัวน้อยลง

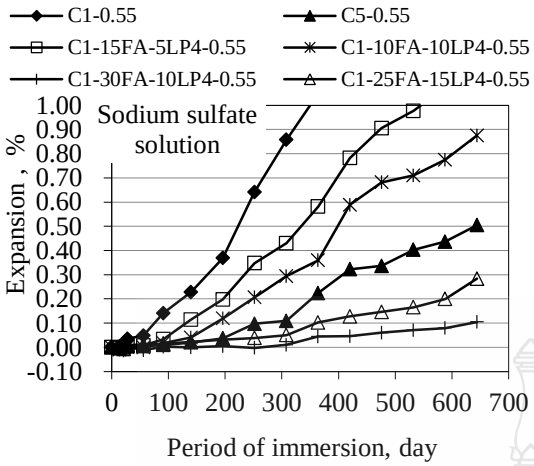
ภาพที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับอายุของการแช่โดยยังคงเป็นของฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร แต่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 พบว่ายังคงให้แนวโน้มในทิศทางเดียวกัน นั่นคือเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยดังกล่าวในปริมาณที่ต่ำ (C1-15FA-5LP4-0.55 และ C1-10FA-10LP4-0.55) ยังให้ค่าการการขยายตัวมาก แต่ในกรณีตัวอย่างที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้น (C1-30FA-10LP4-0.55 และ C1-25FA-15LP4-0.55) ส่งผลให้ค่าการขยายตัวที่ค่อนข้างน้อยโดยเฉพาะอย่างยิ่งมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และเช่นกันเมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่งผลให้การขยายตัวยิ่งน้อยลงคือน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน

ส่วนในกรณีเมื่อฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร ที่แทนที่ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 และทั้งในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ดังภาพที่ 4.11 และ 4.12 ก็ยังให้ผลในแนวโน้มเดียวกับกรณีของฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร

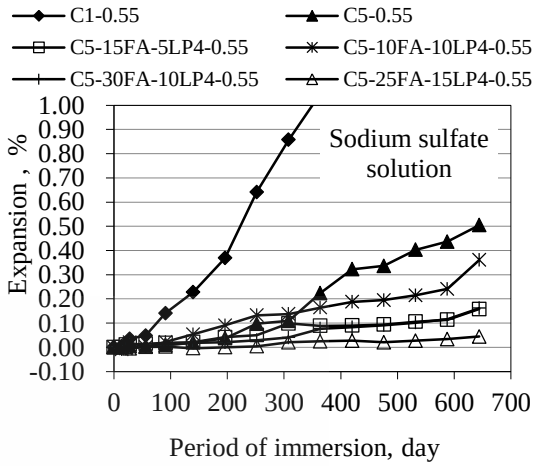


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

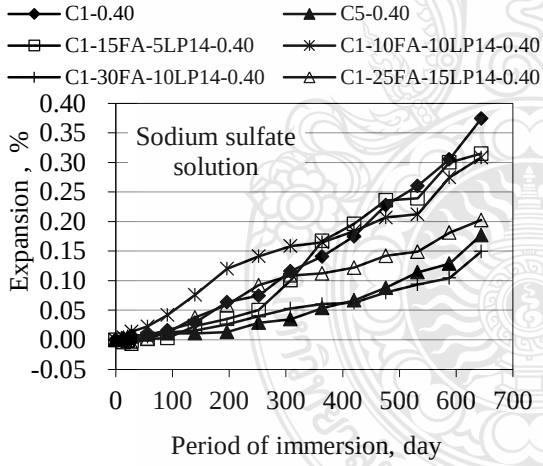


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

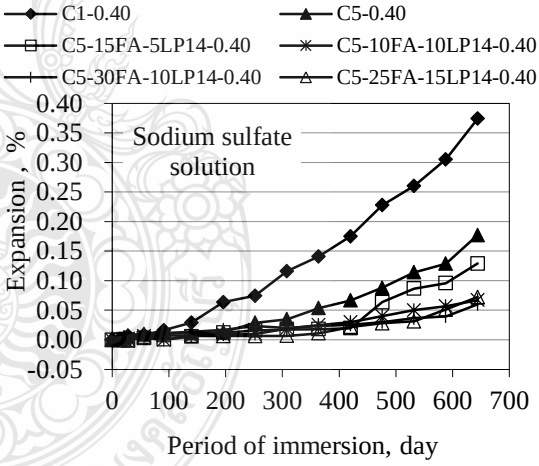


ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

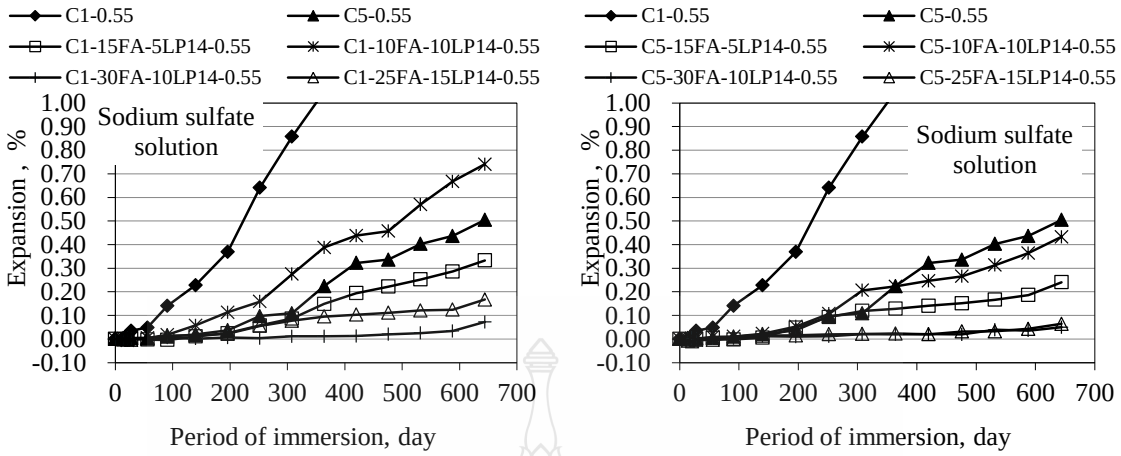


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

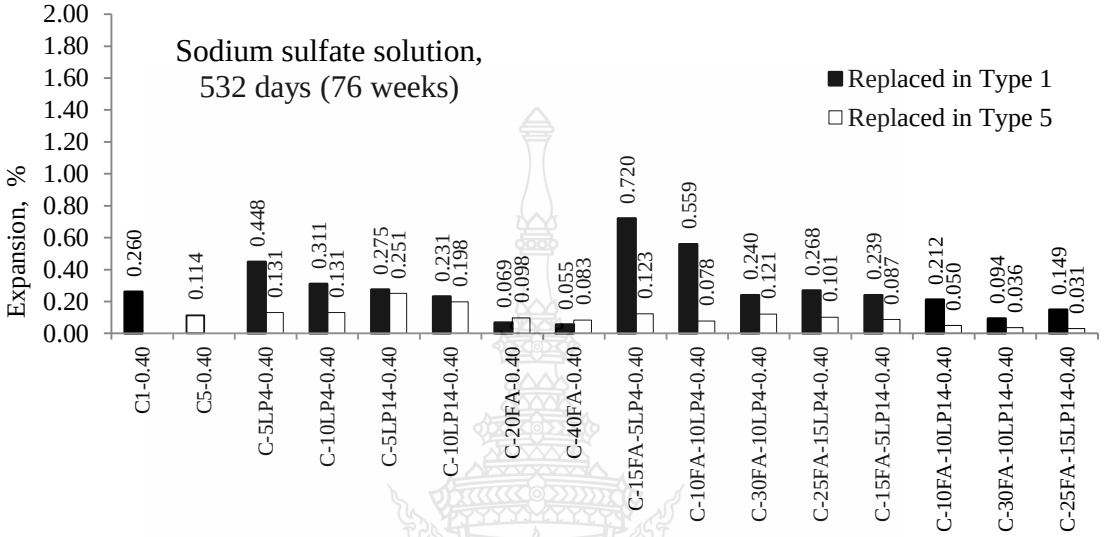


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

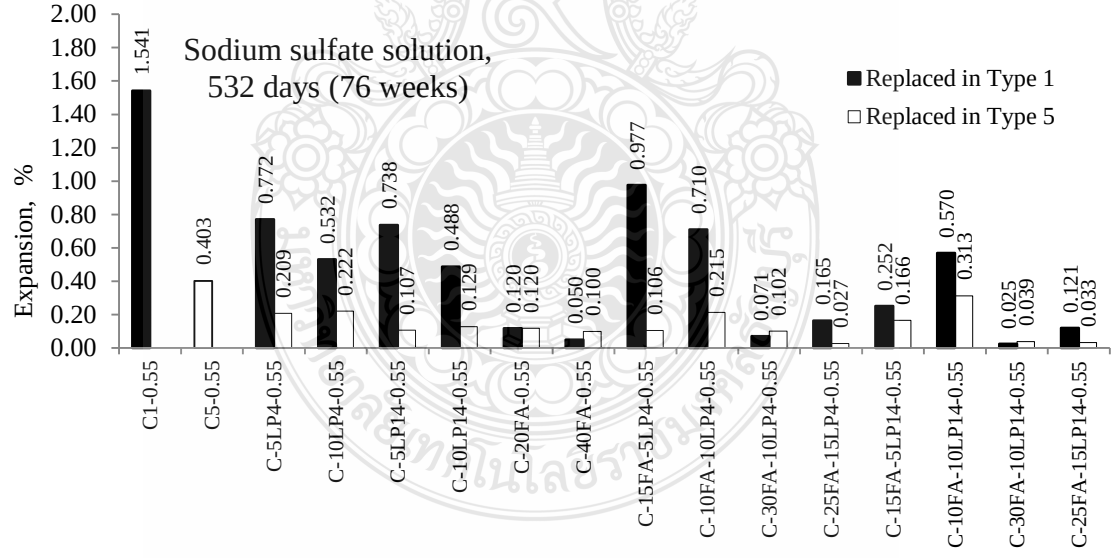
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

อย่างไรก็ตามเพื่อความชัดเจนในการเปรียบเทียบระหว่างค่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้งที่ไม่แทนที่และแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต จึงได้แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวดังภาพที่ 4.13 ซึ่งได้เปรียบเทียบการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 532 วัน ซึ่งพบว่าการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนหรือด้วยเถ้าลอยหรือด้วยฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้น จะให้ค่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนหรือใกล้เคียงหรือน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 จะให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ยกเว้นในกรณีที่แทนที่ในส่วนของเถ้าลอยใช้ครั้งนี้ (ปริมาณร้อยละ CaO เท่ากับ 17.40) ในอัตราส่วนที่ต่ำๆ (ร้อยละ 10) ที่ร่วมกับฝุ่นหินปูนจะให้ค่าการขยายตัวค่อนข้างสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ข้อสังเกต การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยนั้น จะมีแนวโน้มน้อยกว่ากรณีที่แทนที่ดังกล่าวในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

ภาพที่ 4.13 เปรียบเทียบการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 532 วัน

2) กรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

2.1) วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) กรณีเมื่อวัสดุประสานมีการแทนที่ฝุ่นหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภท 5

ภาพที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40 พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ยังคงให้ผลในทิศทางเดียวกันกับกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟต กล่าวคือการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังภาพที่ 4.14(ก) และประเภทที่ 5 ดังภาพที่ 4.14 (ข) ด้วยฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 และร้อยละ 10 ยังให้ค่าน้อยกว่าค่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยที่มีค่าใกล้เคียงหรือมีแนวโน้มว่าจะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับด้วยกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ซึ่งเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

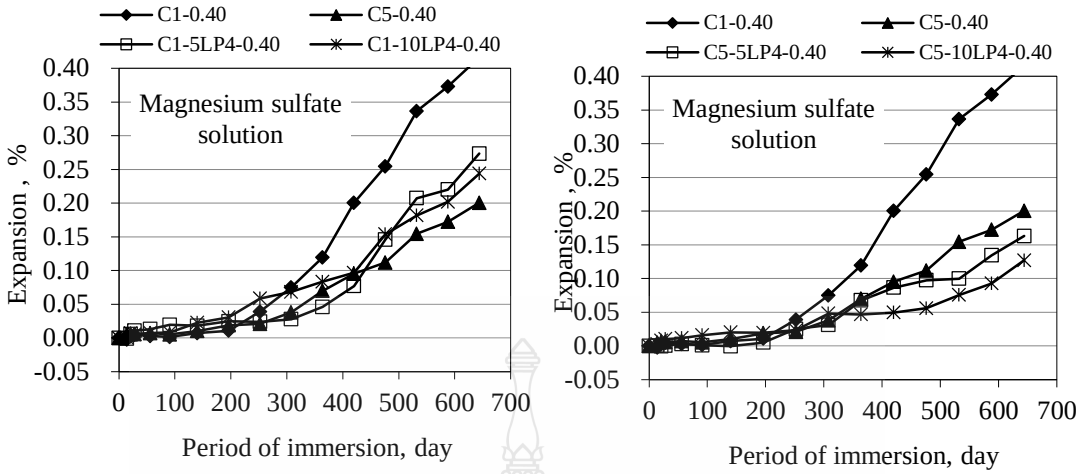
ทำนองเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 พบว่าการขยายตัวของการแทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 มีแนวโน้มว่าจะมากกว่าเมื่อแทนที่ร้อยละ 10 ซึ่งเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้วเช่นกัน

สำหรับภาพที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40 พบว่าค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่ก็ยังคงมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ดังภาพที่ 4.16(ก) ส่วนเมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 กลับพบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ทั้งร้อยละ 5 และร้อยละ 10) มีค่ามากกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วนและทำนองเดียวกันเมื่อแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 ยังให้ค่าการขยายตัวที่มากกว่าการแทนที่การแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร้อยละ 10 ซึ่งก็เป็นในลักษณะเดียวกันกับการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์

ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้นอาจจะใช้แทนการประเมินการต้านทานซัลเฟตไม่เหมาะสมมากนัก ทั้งนี้เพราะกลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้สูญเสียที่ผิวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เด่นชัดกว่าการเกิด Ettringite

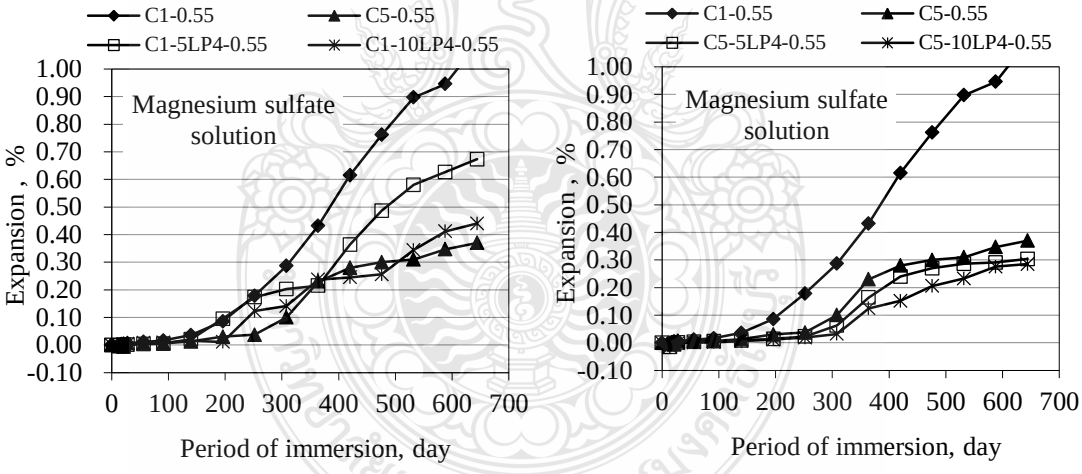
กรณีเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ดังภาพที่ 4.15 และ 4.17 พบว่าการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้งประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ไม่ว่าร้อยละ 5 หรือ ร้อยละ 10 ให้ค่าของการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าการขยายตัวน้อยกว่าในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและใกล้เคียงกันกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน แต่กรณีการแทนที่ฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร ในอัตราร้อยละ 5 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 นั้นมีแนวโน้มว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์จะมากกว่าร้อยละ 10 ส่วนเมื่อแทนที่ฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้งประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ดังภาพที่ 4.17 นั้นพบว่าค่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกับกรณีของการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร ยกเว้นในกรณีแทนที่ฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร ในอัตราส่วนร้อยละ 10 นั้นพบว่าการขยายตัวมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน

อย่างไรก็ตามการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้งสองมีค่าแตกต่างเห็นได้ไม่ชัดเจนเหมือนกับในกรณีของในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ทั้งนี้เพราะในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น Ettringite เกิดน้อยมากหรือไม่มากเท่าในกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟต เนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าไปทำให้ความเป็นด่างในมอร์ต้าร์ลดลง ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้นในมอร์ต้าร์ นอกจากนี้กลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะเข้าไปเปลี่ยนผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ไปเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน



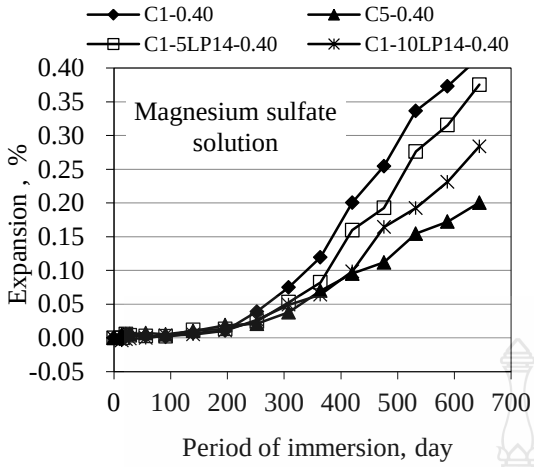
ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

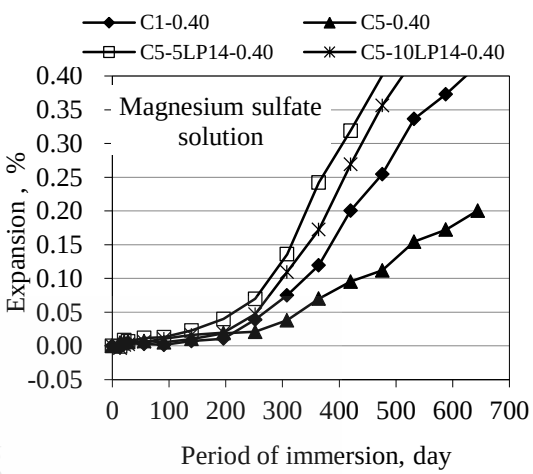


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

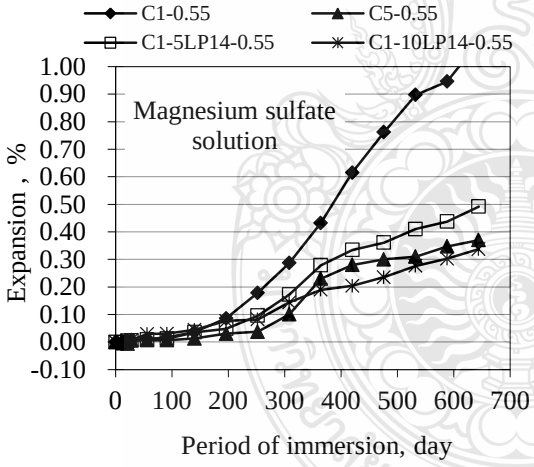


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

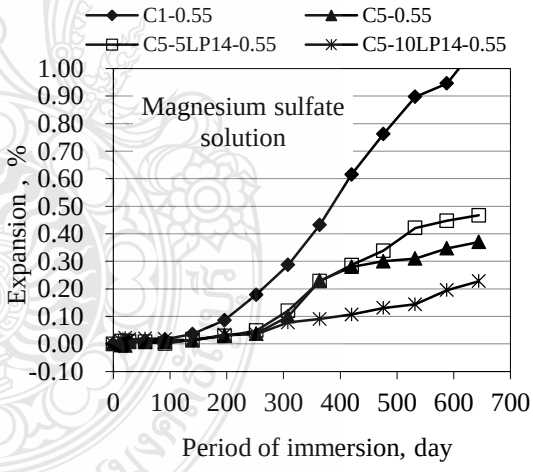


ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

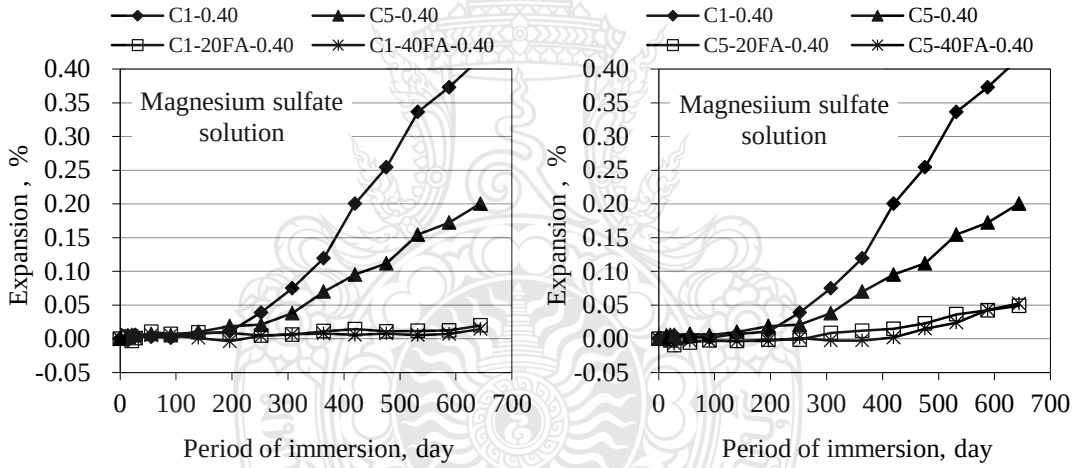


ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

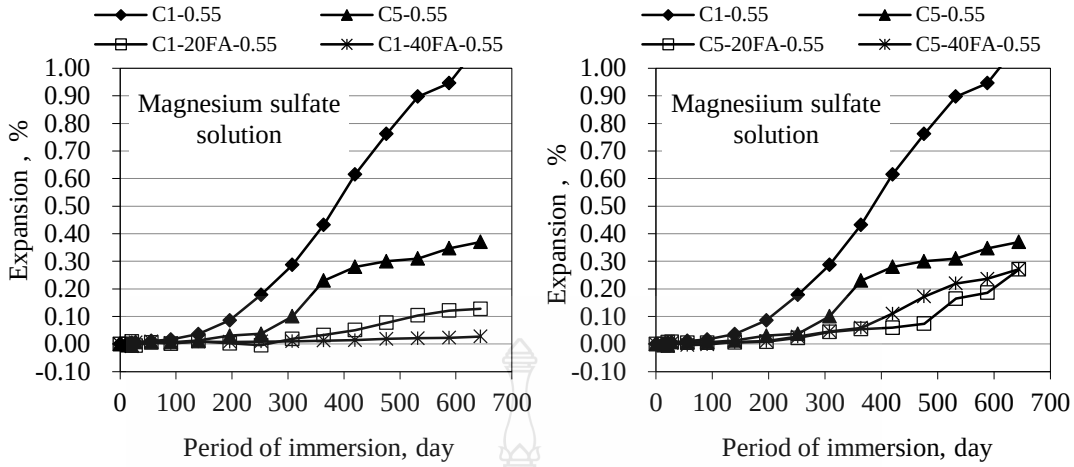
2.2) วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) กรณีเมื่อวัสดุประสานมีการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.18 และ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 ตามลำดับ โดยการแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 และร้อยละ 40 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 พบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ของเถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 20 และ 40 แทนที่ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 และทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 นั้นการขยายตัวไม่ค่อยแตกต่างกันและมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้ซึ่งก็เป็นในทิศทางเดียวกันกับของสารละลายโซเดียมซัลเฟต ซึ่งเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว



ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

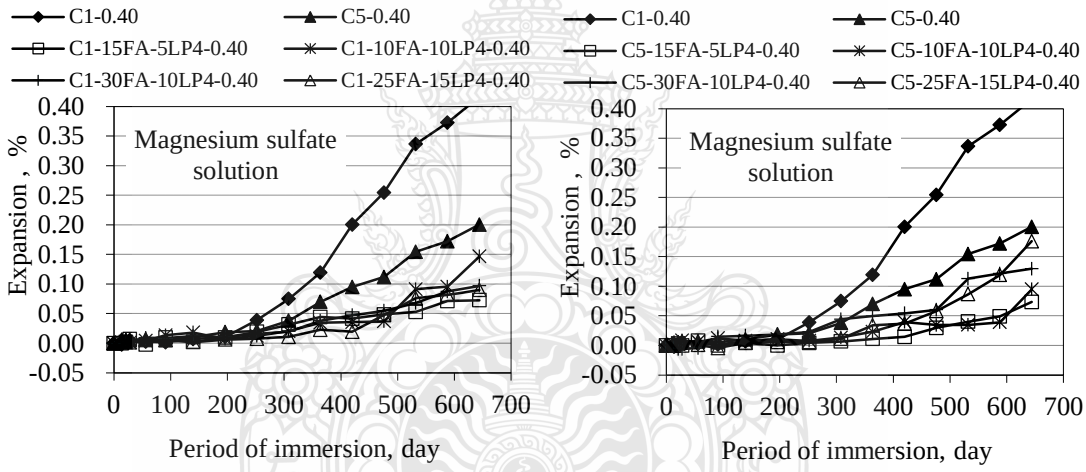
2.3) วัสดุประสานร่วมสามชนิด (Ternary) กรณีเมื่อวัสดุประสานมีการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการแช่ในแมกนีเซียมซัลเฟตกับการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนด้วยเถ้าลอยร่วมกับฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของตัวอย่างมอร์ต้าร์เท่ากับ 0.40 พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยให้การขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าน้อยกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่ของเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน มีผลให้ความพรุนในเพสต์มีค่าน้อยลงรวมทั้งเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงจึงทำให้การขยายตัวเกิดน้อย

ส่วนภาพที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการแช่ในแมกนีเซียมซัลเฟตกับการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยยังคงเป็นของฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร แต่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 พบว่าการแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนปริมาณที่ต่ำๆ ไม่ว่าปริมาณของฝุ่นหินปูนมากหรือน้อย (C1-15FA-5LP4-0.55 และ C1-10FA-10LP4-0.55) มีแนวโน้มว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างจะมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ในขณะที่แทนปริมาณเถ้าลอยที่

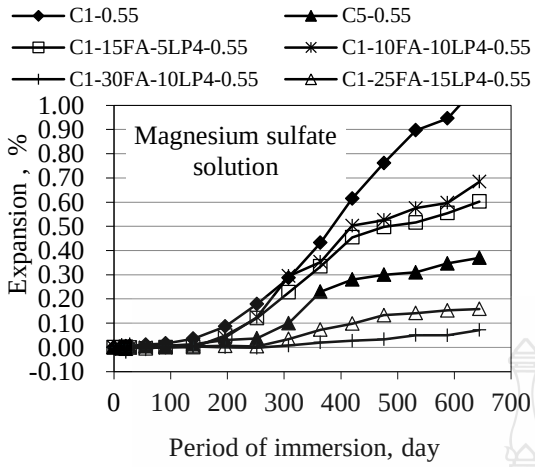
ปริมาณสูงขึ้น (C1-30FA-10LP4-0.55 และ C1-25FA-15LP4-0.55) กลับทำให้ค่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าน้อยกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วนโดยเฉพาะเมื่อปริมาณเถ้าลอยที่สูงๆ (ในครั้งนี้ร้อยละ 30) ทั้งนี้เป็นเพราะเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงเมื่อแทนที่ในปริมาณที่น้อยๆจะมีค่าการขยายตัวมาก แต่เมื่อปริมาณของการแทนที่ที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าการขยายตัวน้อยลง ซึ่งแสดงว่าในกรณีที่กล่าวมาปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยมีผลมากกว่าซึ่งเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ส่วนในกรณีเมื่อฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร ที่แทนที่ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 และทั้งในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 (ภาพที่ 4.22 และ 4.23) ก็ให้ผลในแนวโน้มเดียวกับกรณีของฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร

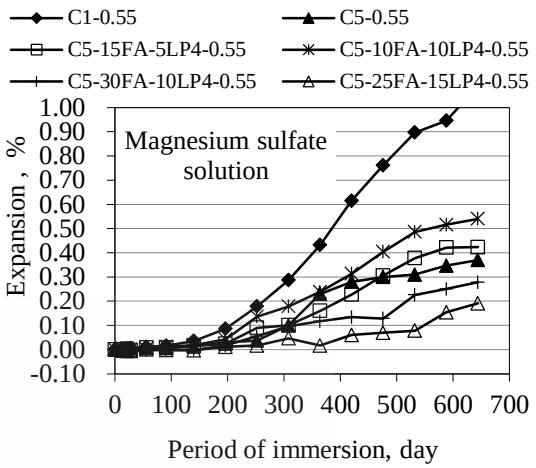


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

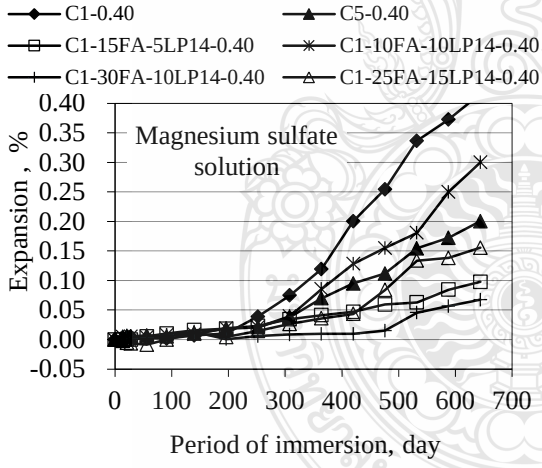


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

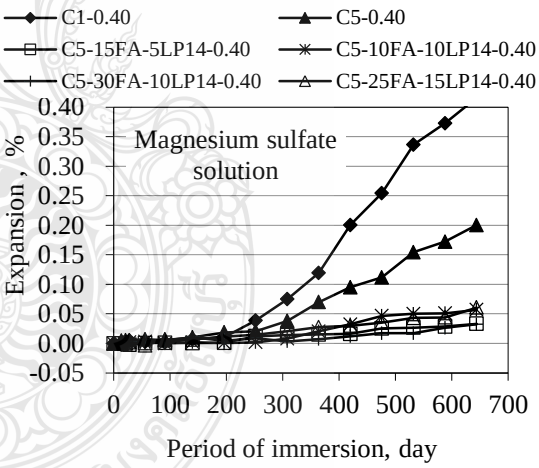


ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชื้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

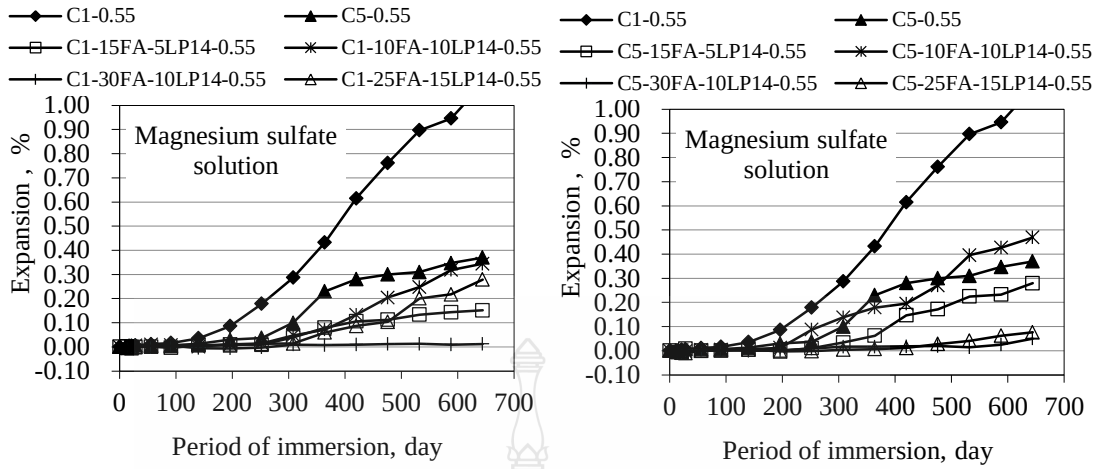


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

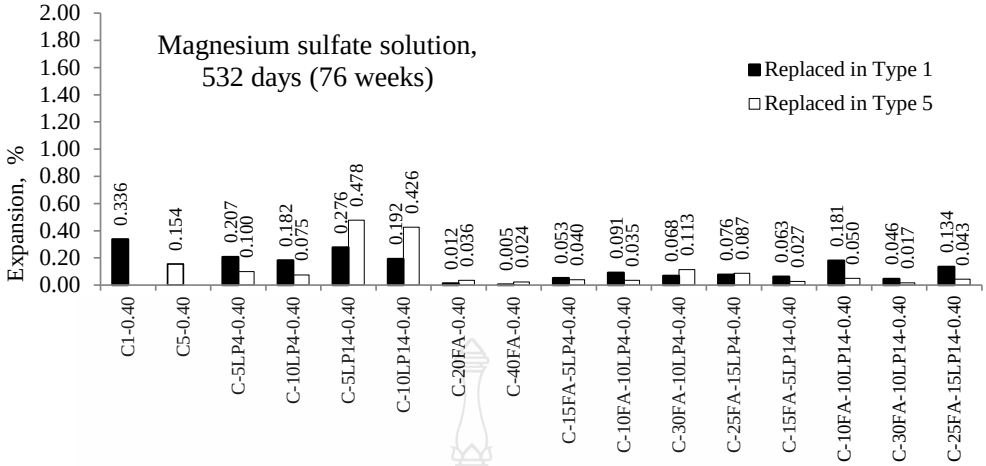
ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชื้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



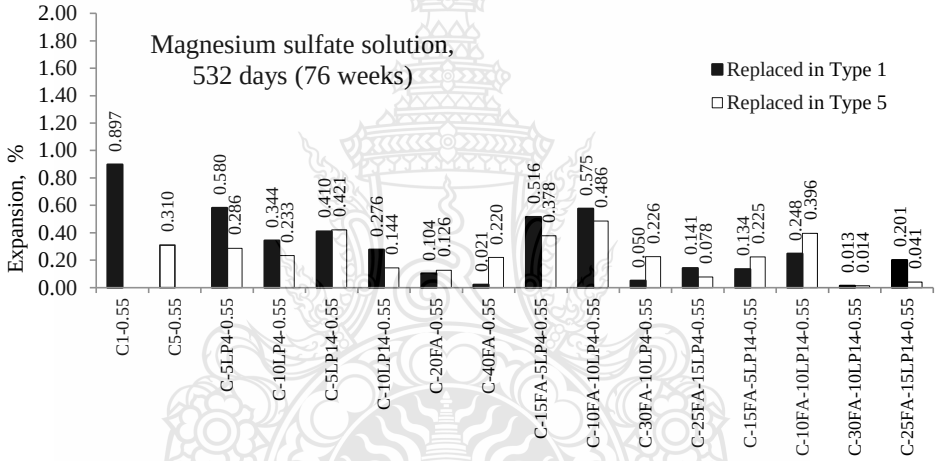
ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

อย่างไรก็ตามเพื่อความชัดเจนในการเปรียบเทียบระหว่างค่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้งที่ไม่แทนที่และแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต จึงได้แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวดังภาพที่ 4.24 ซึ่งได้เปรียบเทียบการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 532 วัน ซึ่งก็เป็นดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

ภาพที่ 4.24 เปรียบเทียบการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 532 วัน

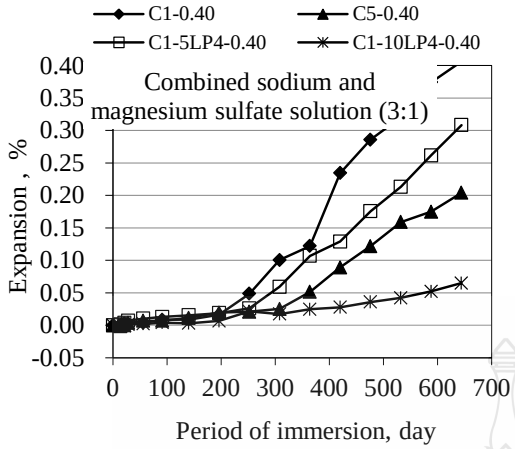
3) กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

สำหรับสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น ในที่นี้ใช้อัตราส่วนผสมโซเดียมซัลเฟตต่อแมกนีเซียมซัลเฟต เท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก

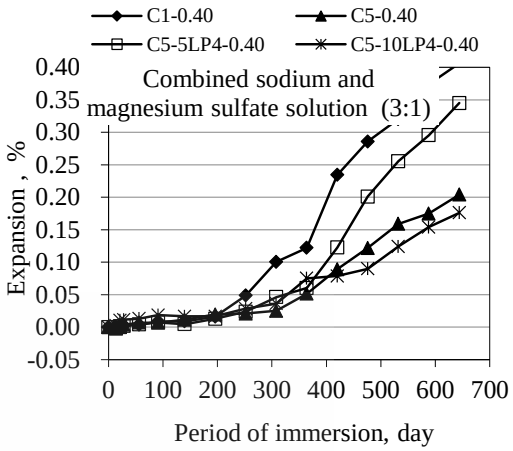
3.1) วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) กรณีเมื่อวัสดุประสานมีการแทนที่ฝุ่นหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.25 และ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40 และ 0.55 พบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ให้ผลในแนวโน้มทิศทางเดียวกับของกรณีสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต กล่าวคือการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และเช่นเดียวกันกับการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนแต่มีค่าใกล้เคียงหรือน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และตัวอย่างมอร์ต้าร์ของฝุ่นหินปูนแทนที่ร้อยละ 5 มีแนวโน้มค่ามากกว่าเมื่อแทนที่ร้อยละ 10 ซึ่งเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว

ส่วนภาพที่ 4.27 และภาพที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40 และ 0.55 ซึ่งผลของค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนก็ให้ค่าในแนวโน้มเดียวกันกับของกรณีในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต กล่าวคือการขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนโดยมีค่าใกล้เคียงหรือน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 5 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ที่มีค่าการขยายตัวมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 กับร้อยละ 10 ก็ยังให้ค่าแนวโน้มเหมือนกับของกรณีสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตคือมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 ให้ค่าการขยายตัวมากกว่ามอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10 (ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55) ทั้งนี้เหตุผลทั้งหมดเป็นดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

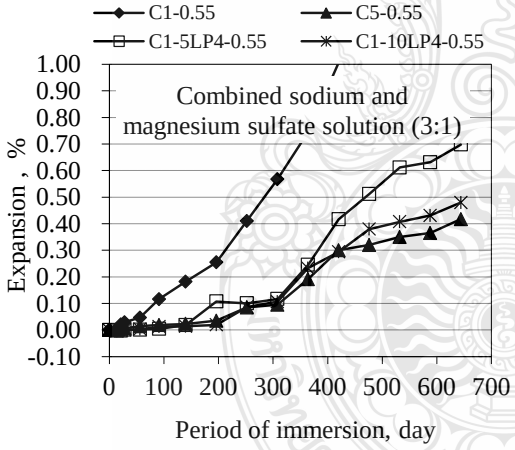


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

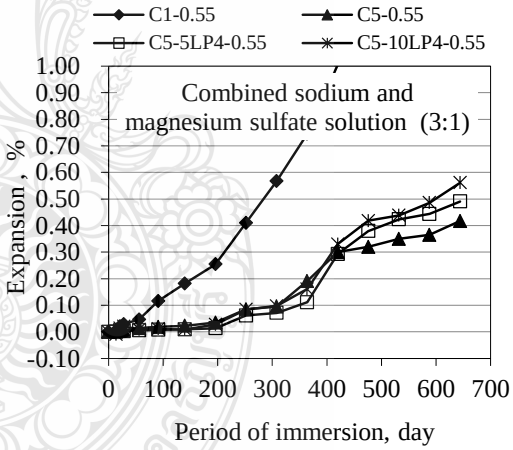


ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

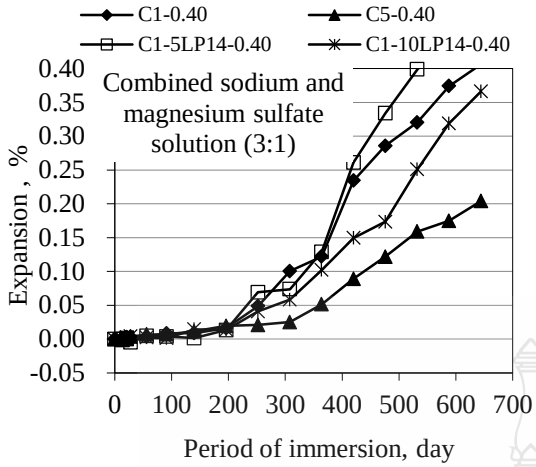


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

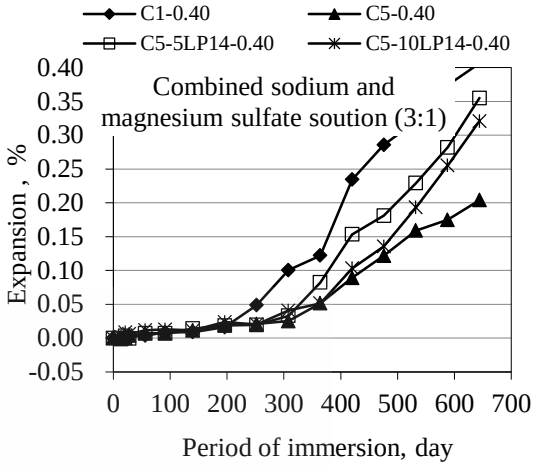


ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

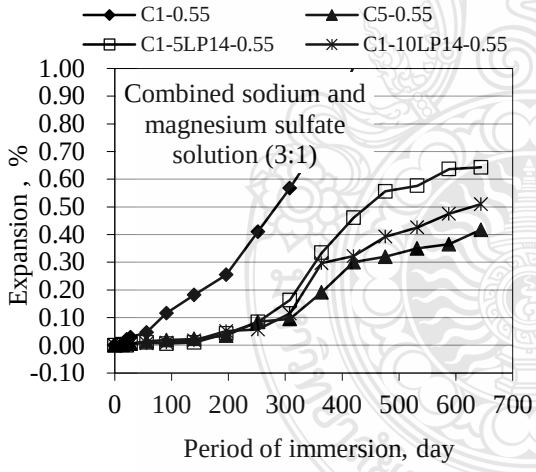


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

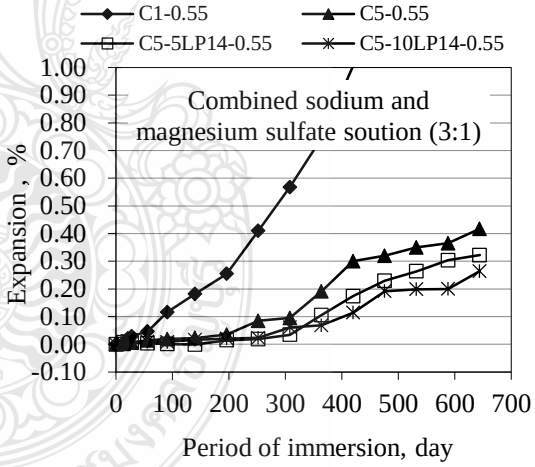


ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

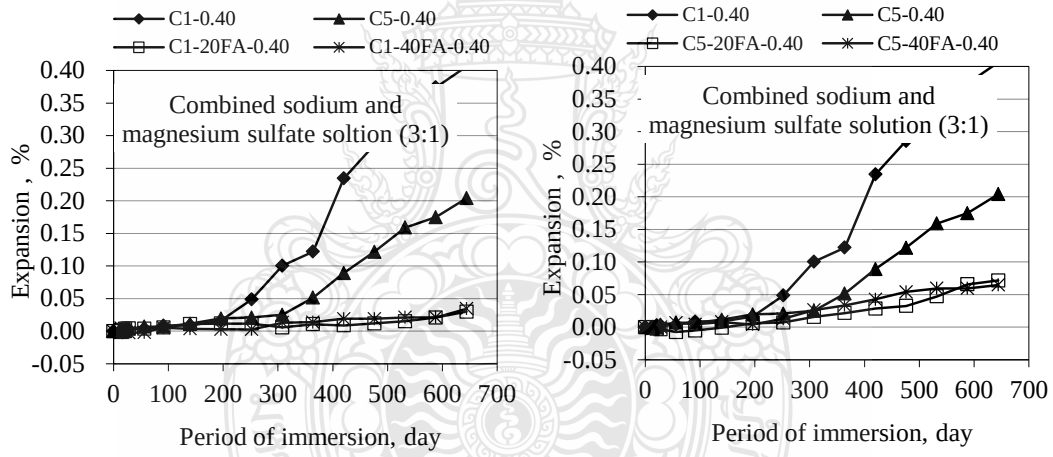


ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) กับอายุของการแช่ในสารละลายลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

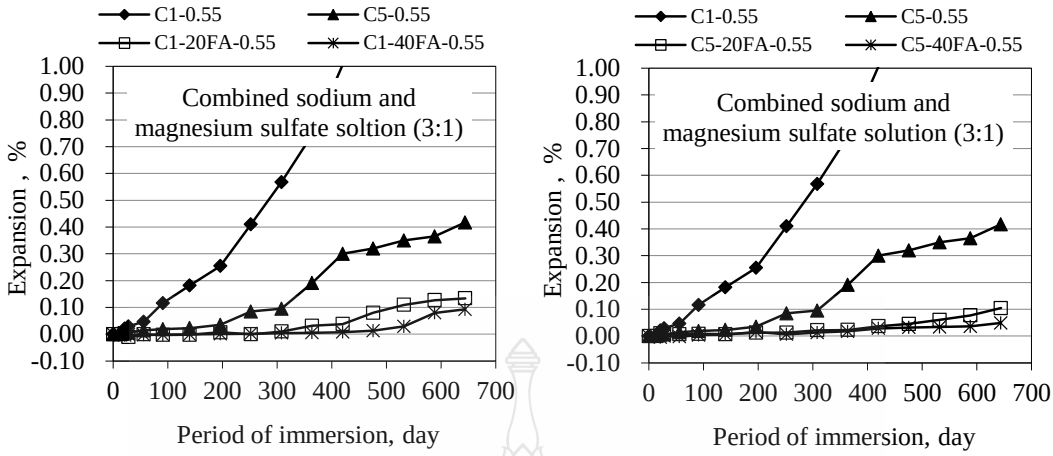
3.2) วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) กรณีเมื่อวัสดุประสานมีการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.29 และ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 โดยการแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 และร้อยละ 40 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 พบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ของเถ้าลอยทั้งของการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วน และการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ของเถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 20 และ 40 นั้นการขยายตัวไม่ค่อยแตกต่างกันซึ่งก็เป็นดังกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

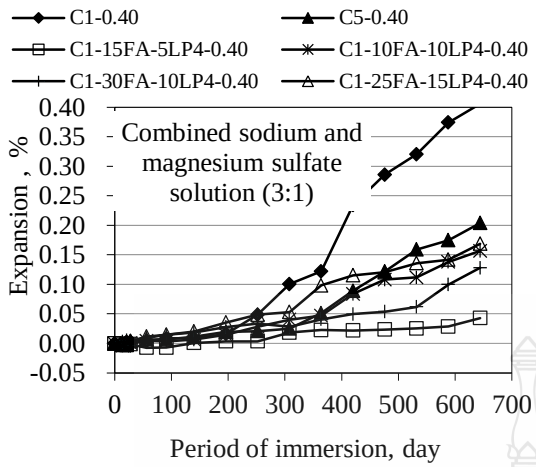


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

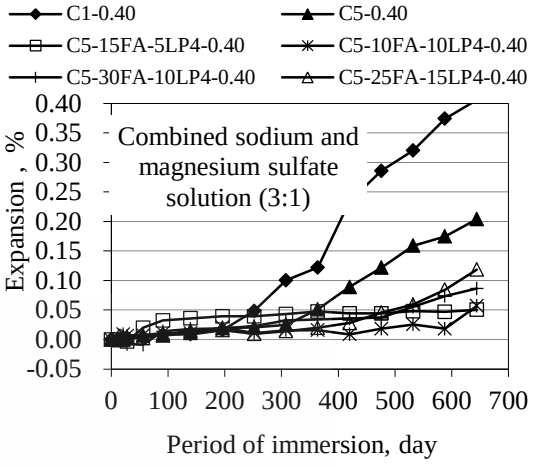
ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

3.3) วัสดุประสานร่วมสามชนิด (Ternary) กรณีเมื่อวัสดุประสานมีการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.31 ถึงภาพที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) กับการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนด้วยเถ้าลอยร่วมกับฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของตัวอย่างมอร์ต้าร์เท่ากับ 0.40 และ 0.55 พบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์นั้นให้ผลในทิศทางเดียวกันกับในกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต กล่าวคือ การแทนที่ฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยมีแนวโน้มว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างจะมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ยกเว้นแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่ต่ำๆมีแนวโน้มว่าค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์จะมีมากขึ้น ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีปริมาณ CaO ค่อนข้างสูง เมื่อแทนที่ในปริมาณต่ำๆจะส่งผลให้ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตมีค่ามากขึ้นแต่เมื่อแทนที่เถ้าลอยดังกล่าวในปริมาณที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าน้อยลงเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว

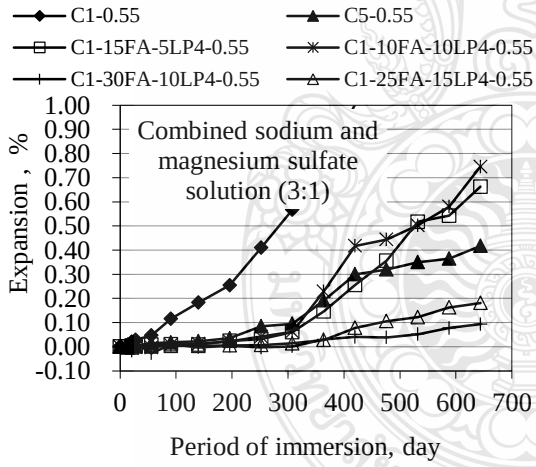


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

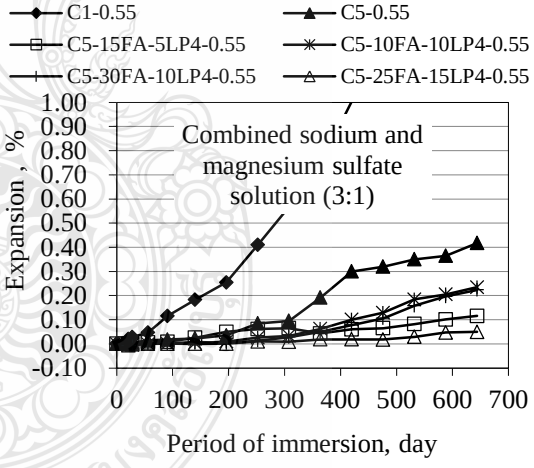


ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

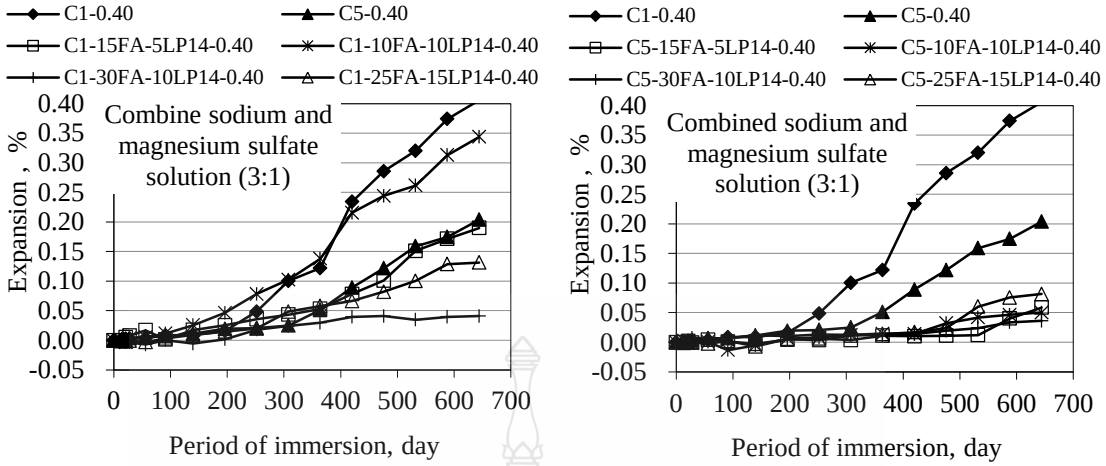


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



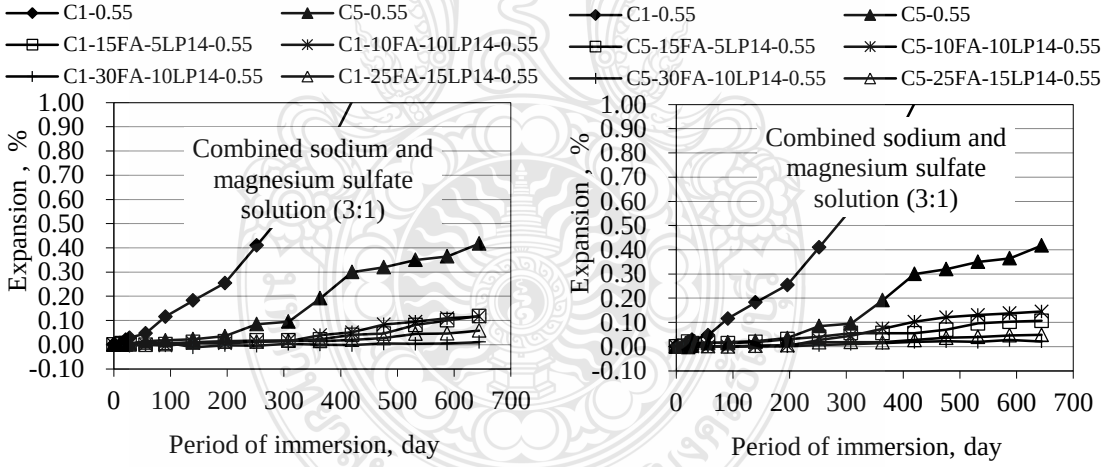
ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55



ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

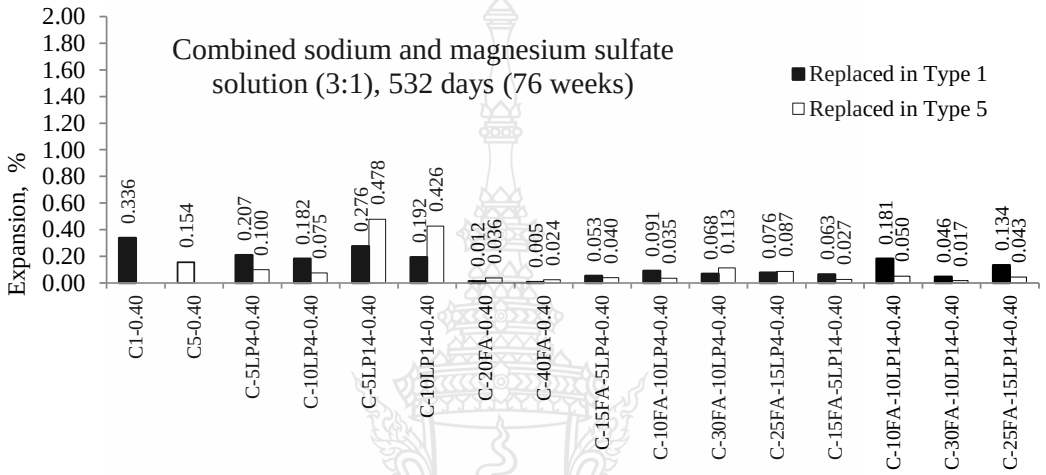
ภาพที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



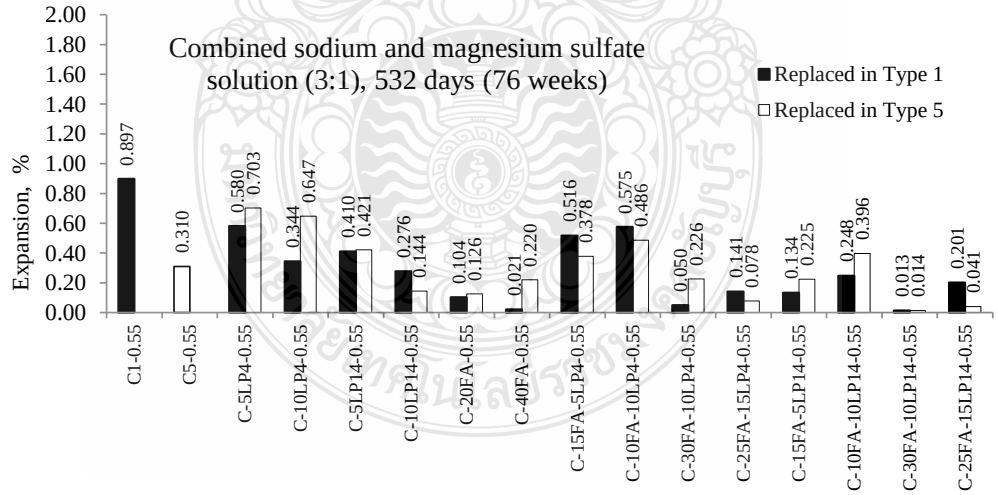
ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

เพื่อความชัดเจนในการเปรียบเทียบระหว่างค่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้งที่ไม่แทนที่และแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) จึงได้แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวดังภาพที่4.35 ทำให้เห็นค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์เปรียบเทียบได้ชัดเจนยิ่งขึ้นซึ่งก็เป็นไปดังที่ได้อธิบายมาแล้ว



ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

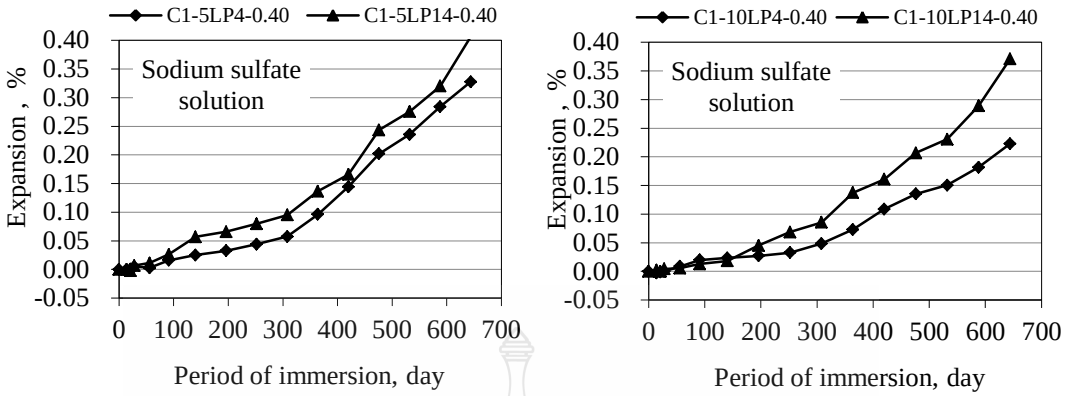
ภาพที่ 4.35 เปรียบเทียบการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) 532 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55

4.2.2 ผลกระทบจากความละเอียดของฝุ่นหินปูนต่อการขยายตัว

สำหรับฝุ่นหินปูนที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ ได้ใช้ฝุ่นหินปูนที่มีความละเอียดเฉลี่ยของอนุภาคขนาด 4 ไมโครเมตร และขนาด 14 ไมโครเมตร ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับลักษณะบางประการของฝุ่นหินปูนดังกล่าว ตลอดจนการแทนที่ในวัสดุประสานตัวอื่นๆ ที่ศึกษาวิจัยในครั้งนี้นั้นดังที่ได้กล่าวมาแล้วโดยเมื่อพิจารณาผลกระทบจากความละเอียดของฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร และขนาด 14 ไมโครเมตร ต่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตมีรายละเอียดดังนี้

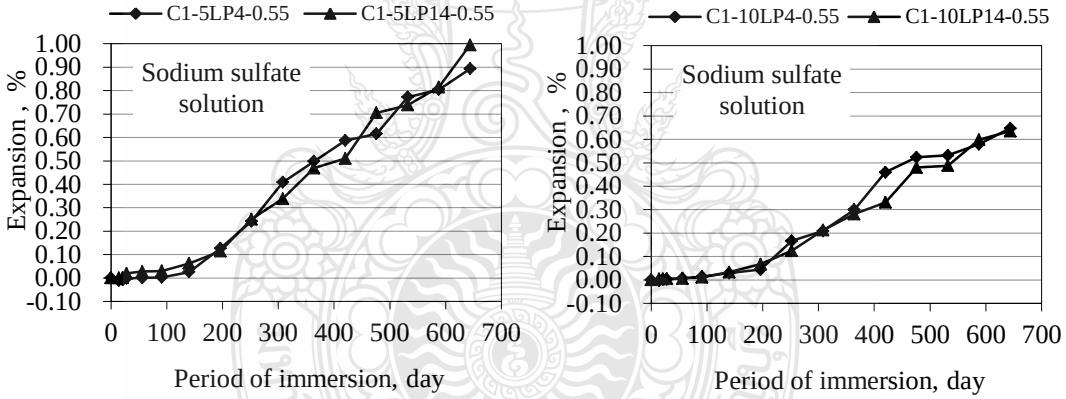
ภาพที่ 4.36 ถึงภาพที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตรทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 (ร้อยละ 5 และร้อยละ 10) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตพบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตรมีค่าไม่แตกต่างกันหรือใกล้เคียงกับค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตรเมื่อเปรียบเทียบในเงื่อนไขเดียวกัน นั่นก็แสดงว่าความละเอียดของฝุ่นหินปูนนั้นให้ผลไม่ค่อยชัดเจนนักต่อผลกระทบต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตดังกล่าว

ส่วนภาพที่ 4.40 ถึงภาพที่ 4.43 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตรและ 14 ไมโครเมตร ที่แทนที่ร้อยละ 5 และร้อยละ 10 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ในขณะที่ภาพที่ 4.44 ถึง ภาพที่ 4.47 เป็นของกรณีสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งก็ให้ผลกระทบจากความละเอียดของฝุ่นหินปูนระหว่างขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร และ 14 ไมโครเมตร ต่อการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตทั้ง 2 ชนิด ในทำนองเดียวกับของสารละลายโซเดียมซัลเฟต ทั้งนี้สังเกตได้จากการขยายตัวของมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร และ 14 ไมโครเมตร ที่เห็นนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก หรือบางกรณีมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร มีค่ามากกว่าแต่บางกรณีกลับให้ค่าการขยายตัวที่น้อยกว่า นั่นแสดงให้เห็นว่าความละเอียดของฝุ่นหินปูนนั้นให้ผลไม่ค่อยชัดเจนต่อผลกระทบต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตดังกล่าว



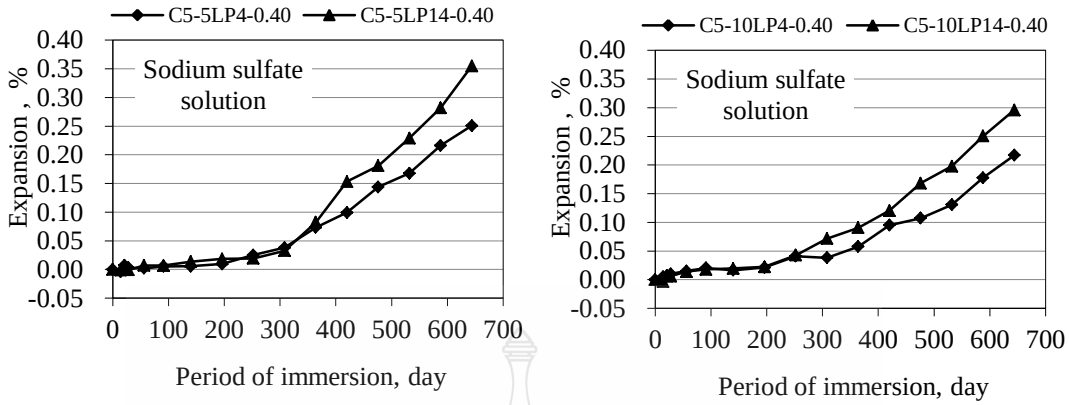
ก) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 ข) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



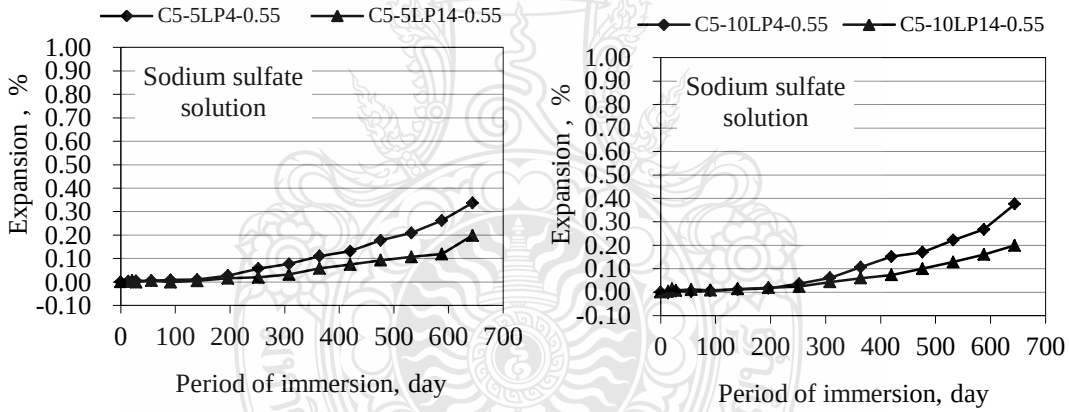
ก) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 ข) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55



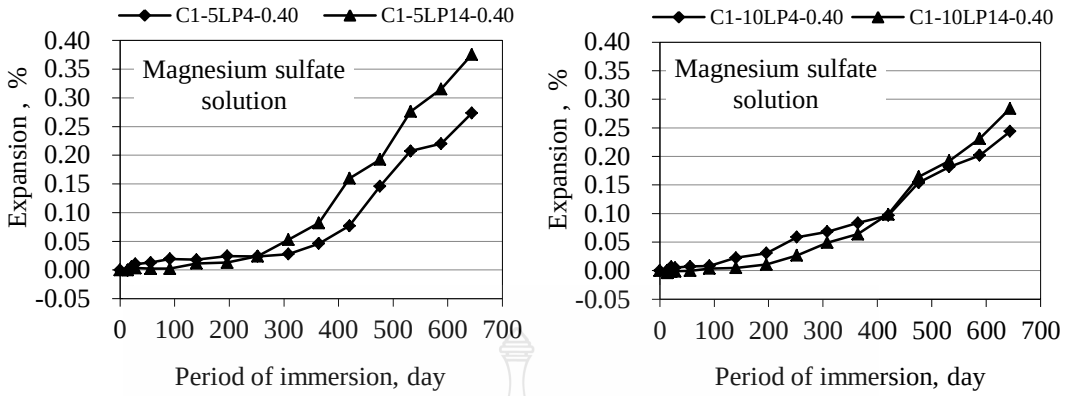
ก) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 ข) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



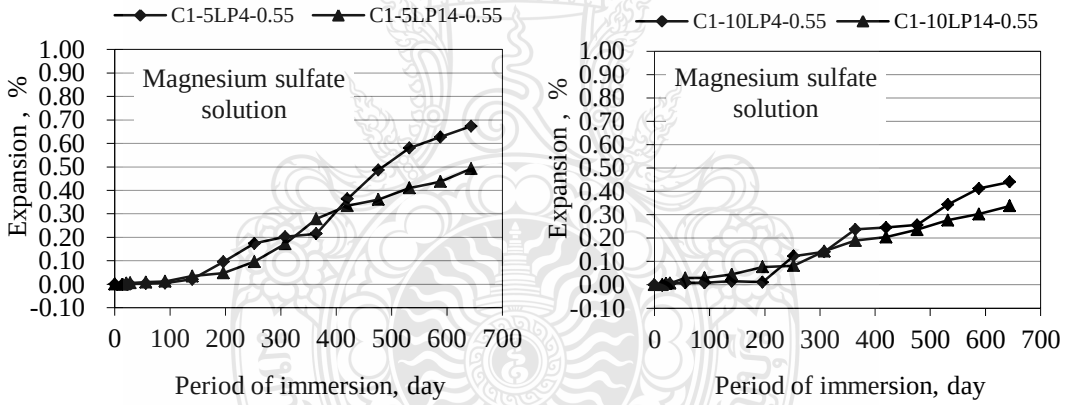
ก) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 ข) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55



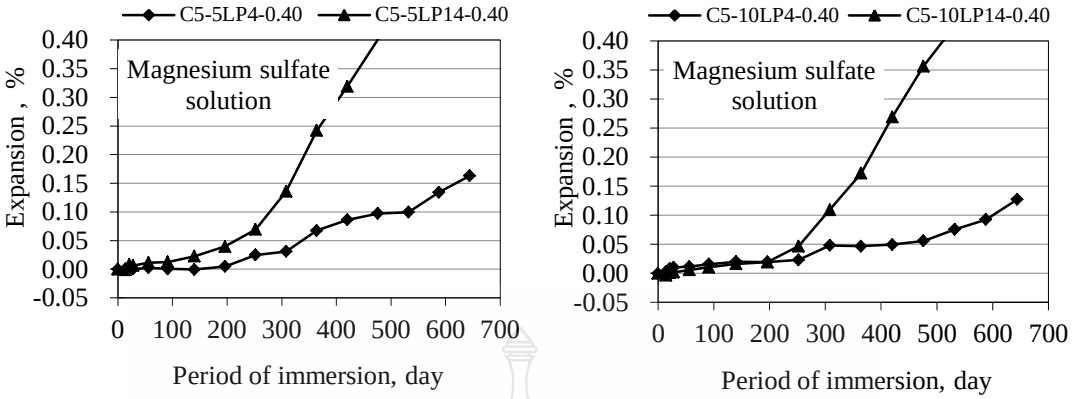
ก) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 ข) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



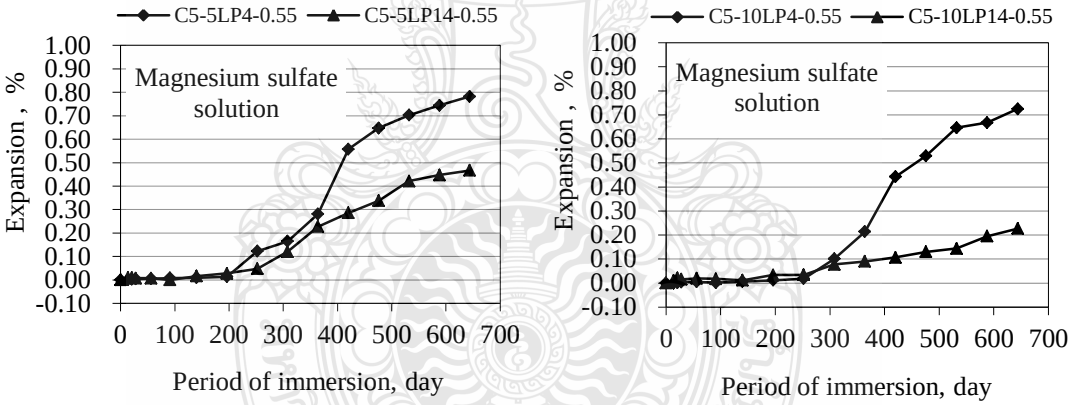
ก) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 ข) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55



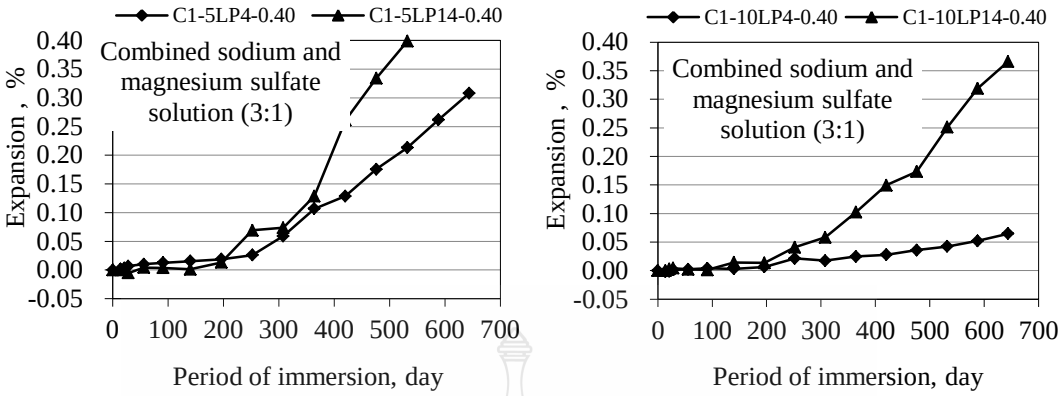
ก) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 ข) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



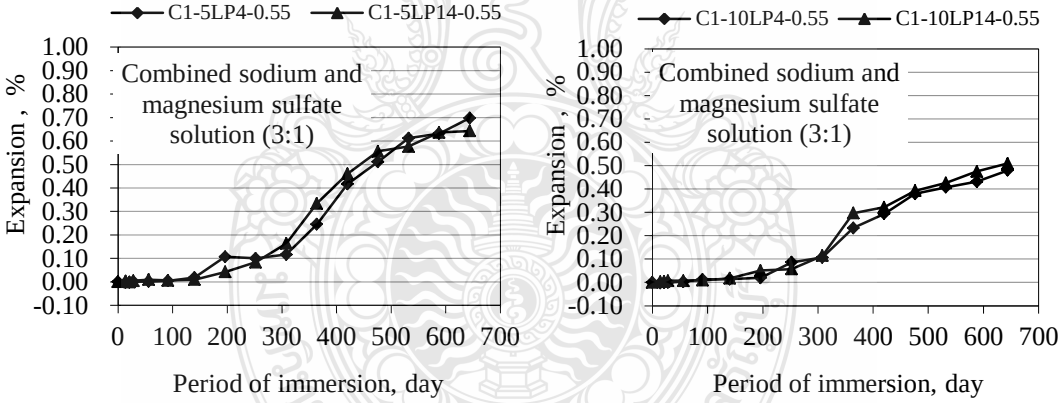
ก) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 ข) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55



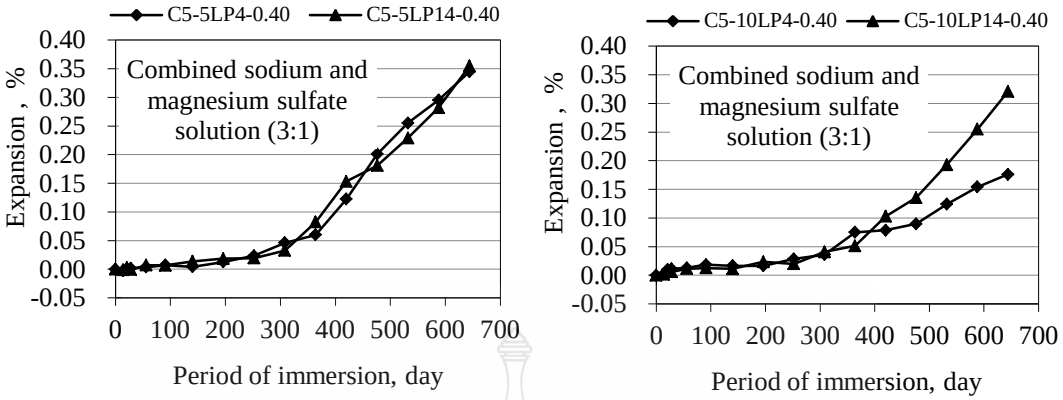
ก) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 ข) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



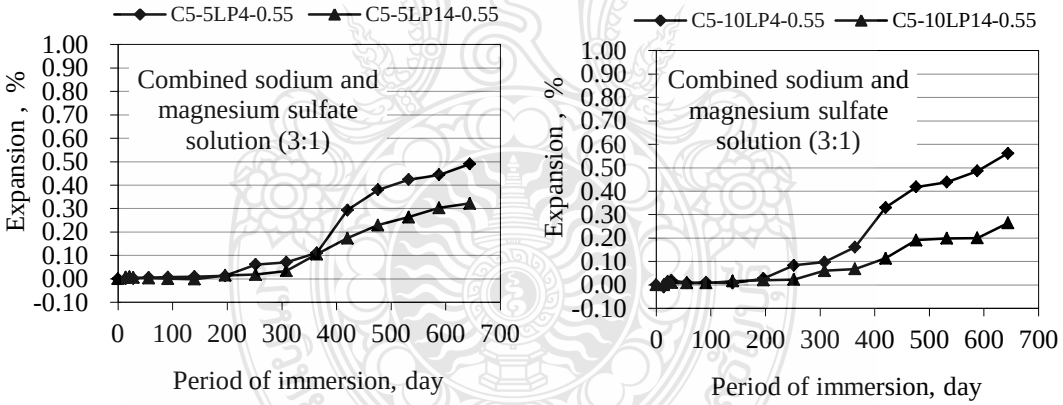
ก) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 ข) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55



ก) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 ข) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ก) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 ข) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

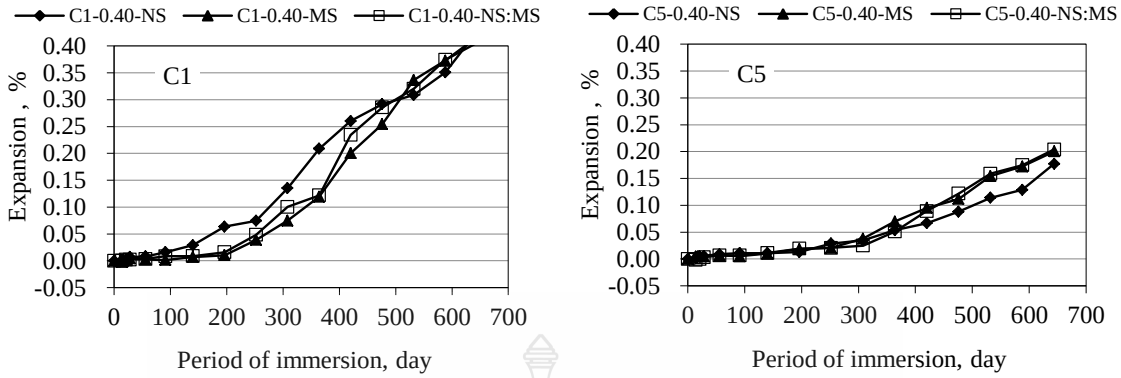
ภาพที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

4.2.3 ผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต

สารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้สารละลายซัลเฟต 3 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับสารละลายแมกนีเซียมในอัตราส่วน 3:1โดยน้ำหนัก ดังนั้นในการประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยวัดการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์นั้น จึงได้พิจารณาถึงผลกระทบของชนิดของสารละลายซัลเฟตทั้ง 3 กรณี ที่มีต่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

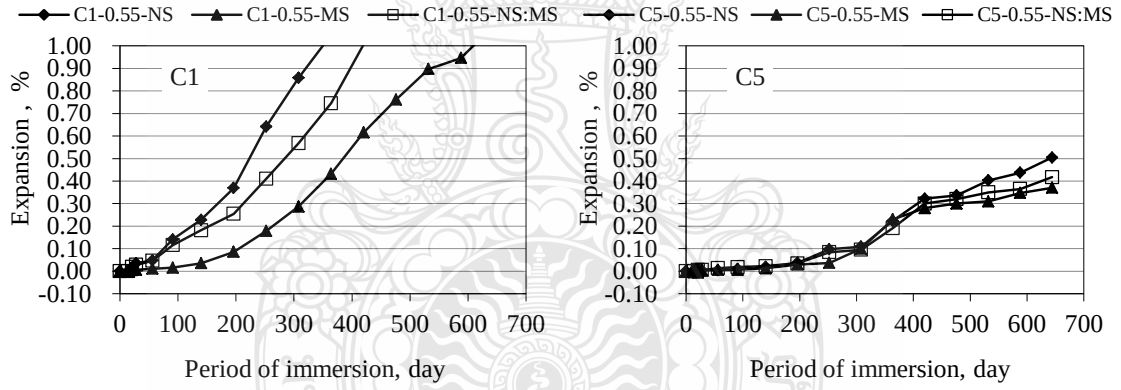
1) เมื่อวัสดุประสานเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน

ภาพที่4.48 และ 4.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 กับอายุของการแช่ในสารละลายซัลเฟตเพื่อแสดงเปรียบเทียบถึงผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต พบว่าในกรณีที่การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าค่อนข้างน้อยในที่นี้ซึ่งได้แก่มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วนเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 มีค่าไม่แตกต่างกันหรือแตกต่างกันน้อยมากระหว่างการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตทั้ง 3 ชนิด นั่นแสดงว่าผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตมีค่าน้อยเมื่อมีการใช้ปริมาณน้ำน้อยๆหรือในกรณีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แต่เมื่อมีการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้น (ในที่นี้เท่ากับ 0.55) ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่ามากที่สุด ถัดมาเป็นสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต และเป็นในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตน้อยที่สุด ทั้งนี้เพราะกลไกการทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะทำให้เกิดยิปซั่มและEttringite ซึ่งมีคุณสมบัติในการขยายตัวค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตผลไฮเดรชั่นอื่นๆ ส่วนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้นเป็นการเปลี่ยน CSH ให้เป็น MSH ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสานหรืออาจเกิดเพียงยิปซั่มเท่านั้นจึงทำให้การขยายตัวมีเหมือนกันแต่ไม่มากเท่ากับกรณีของโซเดียมซัลเฟต ส่วนในกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต ส่งผลให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์อยู่ระหว่างของโซเดียมซัลเฟตกับแมกนีเซียมซัลเฟตเพราะเป็นการผสมระหว่างสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับแมกนีเซียมซัลเฟต



ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน

ภาพที่ 4.48 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



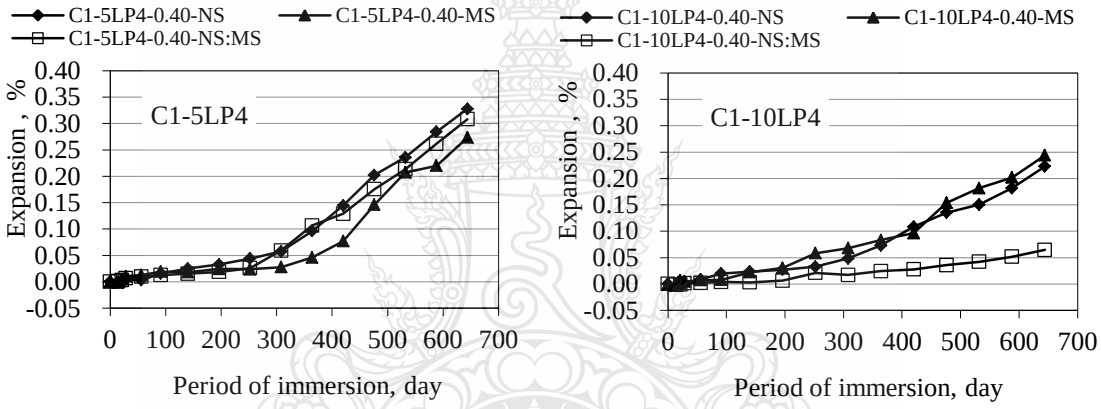
ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน

ภาพที่ 4.49 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

2) วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) กรณีเมื่อวัสดุประสานมีการแทนที่ฝุ่นหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

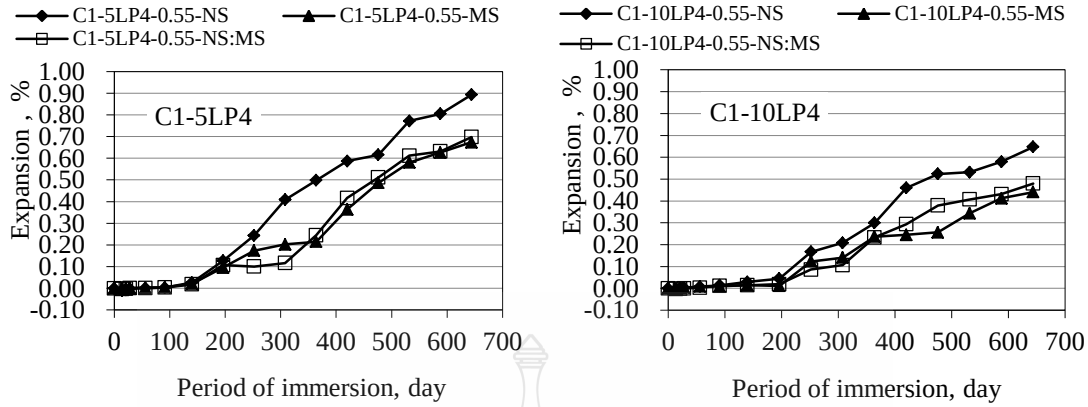
ภาพที่ 4.50 ถึง 4.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร และแทนที่ด้วยฝุ่น

หินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 กับอายุของการแช่ในสารละลายซัลเฟต เพื่อใช้ประกอบในการพิจารณาผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่สัมผัสกับสารละลายซัลเฟต พบว่าให้ผลในแนวโน้มเดียวกันกับกรณีของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนดังที่ได้กล่าวมาแล้วคือการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะมีค่ามากที่สุดต่อมาเป็นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต สุดท้ายเป็นของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และก็เช่นกันจะเห็นได้ชัดเจนมากขึ้น เมื่อมีค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ค่อนข้างมาก แต่ถ้าค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าน้อย ผลของสารละลายซัลเฟตก็จะมีผลน้อยมากหรือแทบไม่มีผลต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตซึ่งเหตุผลเหล่านี้ก็เป็นดังที่กล่าวมาแล้ว



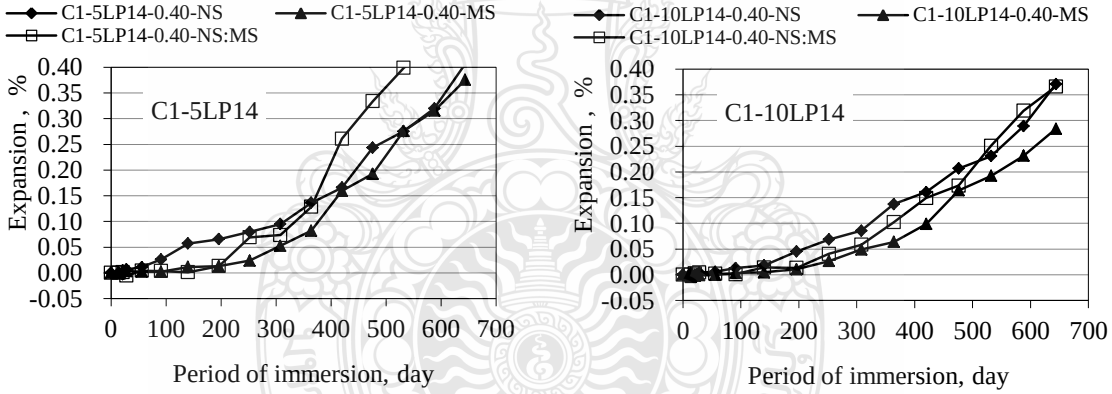
ก) แทนฝุ่นหินปูนที่ร้อยละ 5 ข) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 4.50 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



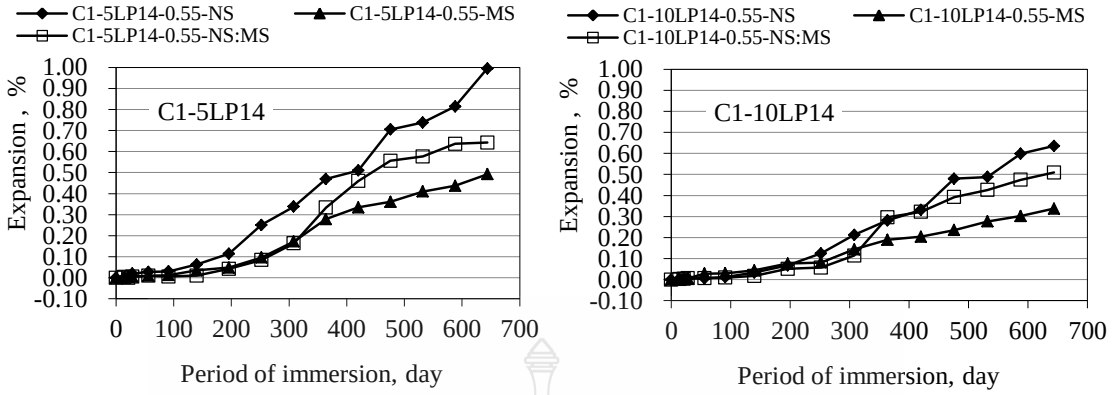
ก) แทนฝุ่นหินปูนที่ร้อยละ 5 ข) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 4.51 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55



ก) แทนฝุ่นหินปูนที่ร้อยละ 5 ข) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 4.52 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

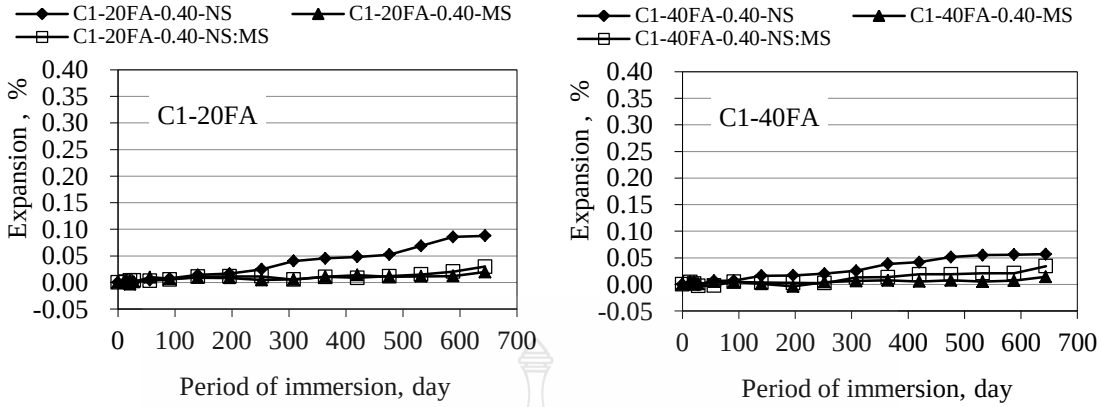


ก) แทนฝุ่นหินปูนที่ร้อยละ 5 ข) แทนที่ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 4.53 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

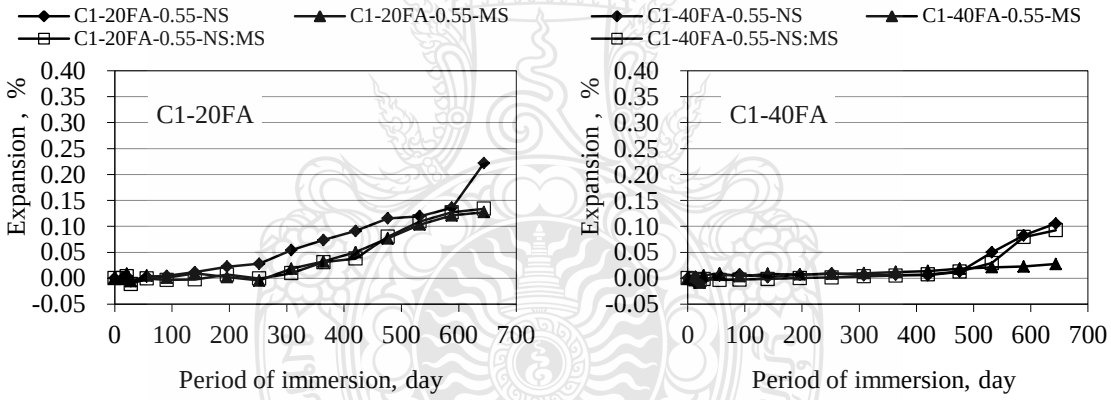
3) วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) กรณีเมื่อวัสดุประสานมีการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.54 ถึงภาพที่ 4.57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ร้อยละ 20 และ 40) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 กับอายุของการแช่ในสารละลายซัลเฟต เพื่อพิจารณาผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่สัมผัสกับสารละลายซัลเฟต พบว่าชนิดของสารละลายซัลเฟตมีผลกระทบต่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างน้อยมาก ทั้งนี้เป็นเพราะการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตทั้ง 3 ชนิด มีค่าน้อยมาก จึงทำให้การขยายตัวมีค่าไม่ค่อยแตกต่างกัน



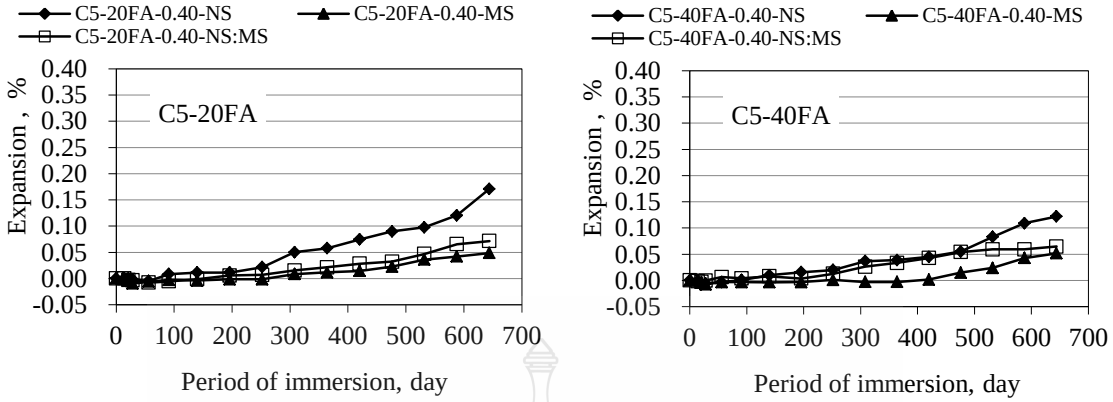
ก) แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 ข) แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 40

ภาพที่ 4.54 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



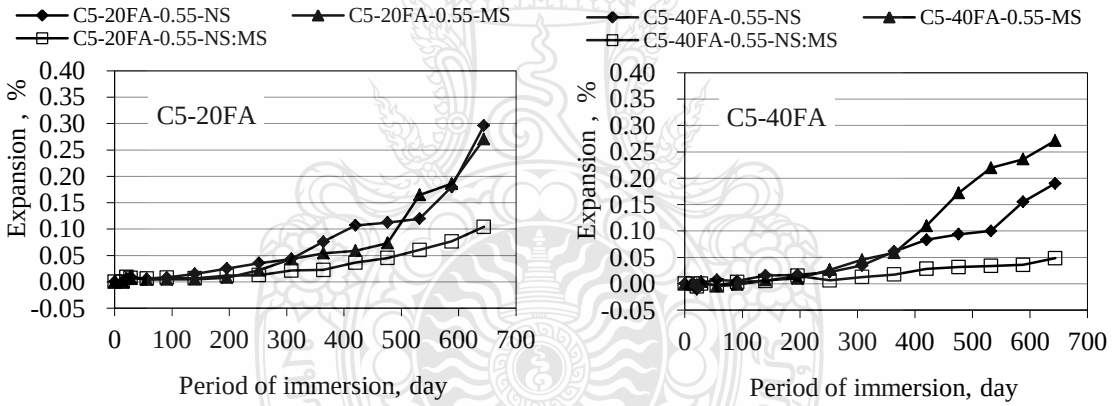
ก) แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 ข) แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 40

ภาพที่ 4.55 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55



ก) แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 ข) แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 40

ภาพที่ 4.56 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



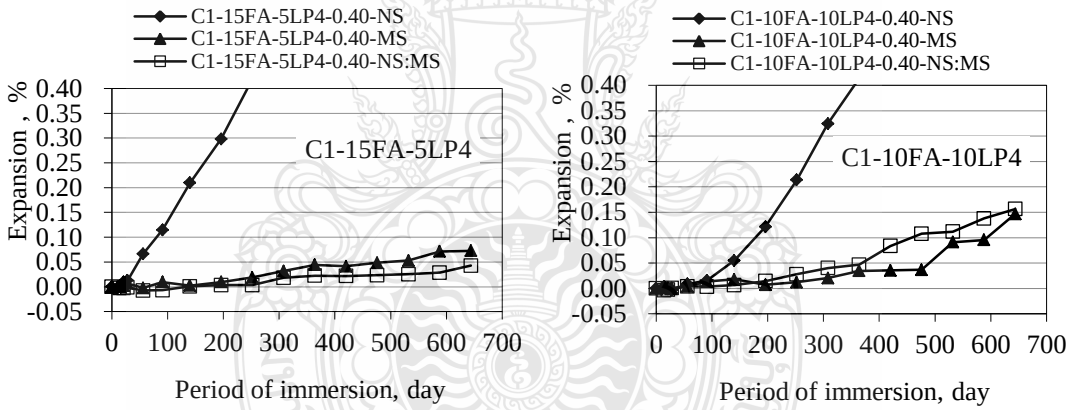
ก) แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 ข) แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 40

ภาพที่ 4.57 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

4) วัสดุประสานร่วมสามชนิด (Ternary) กรณีเมื่อวัสดุประสานมีการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

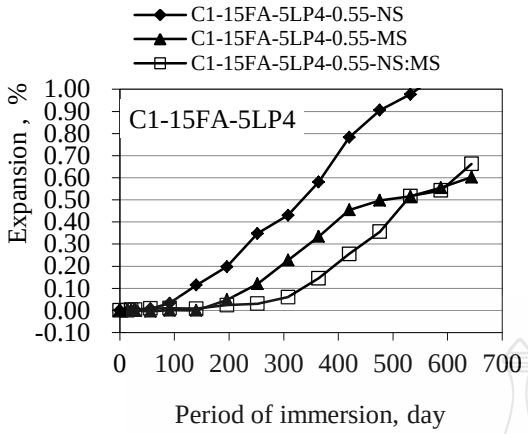
ภาพที่ 4.58 ถึ 4.65 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยทั้งฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อ

วัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 กับอายุของการแช่ในสารละลายซัลเฟต เพื่อใช้ประกอบในการพิจารณาผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่สัมผัสกับสารละลายซัลเฟต พบว่าให้แนวโน้มในลักษณะเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วคือค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะมีค่ามากที่สุดต่อมาเป็นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟตและสุดท้ายเป็นของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่อย่างไรก็ตามมีข้อสังเกตว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตกับของโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าไม่ค่อยแตกต่างกันหรือแตกต่างกันไม่เด่นชัดมากนัก นั่นแสดงว่าการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีผลมากกว่าของสารละลายโซเดียมซัลเฟต และทำนองเดียวกันถ้าค่าของการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตมีค่าค่อนข้างน้อยส่งผลให้ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวน้อยมากหรือไม่มีผลกระทบนั่นเองเพราะว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์แทบจะไม่แตกต่างกันเลยหรือแตกต่างน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบด้วยกันในสารละลายซัลเฟตทั้ง 3 ชนิด

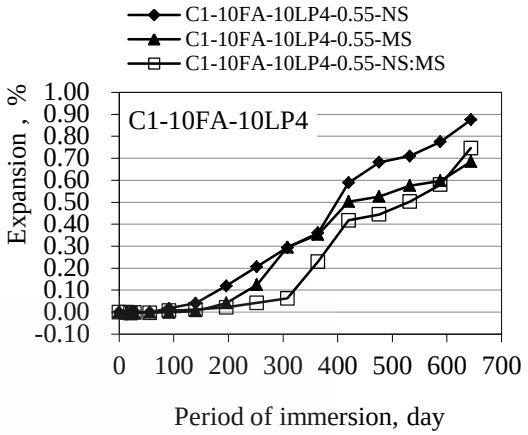


ก) เถ้าลอยร้อยละ 15 ฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 ข) เถ้าลอยร้อยละ 10 ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 4.58 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

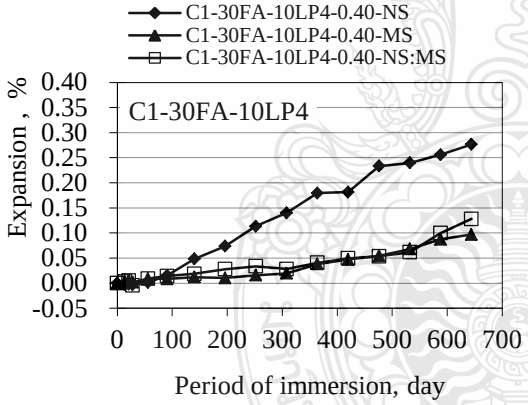


ก) เถ้าลอยร้อยละ 15 ฝุ่นหินปูนร้อยละ 5

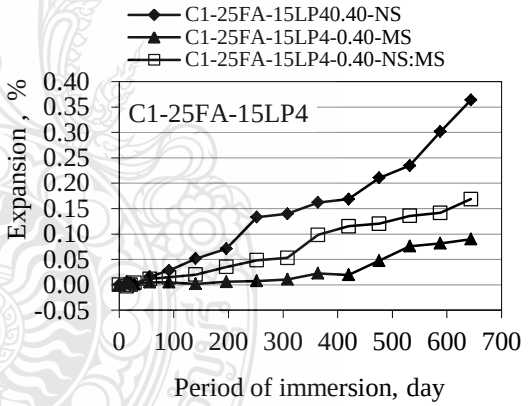


ข) เถ้าลอยร้อยละ 10 ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 4.59 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

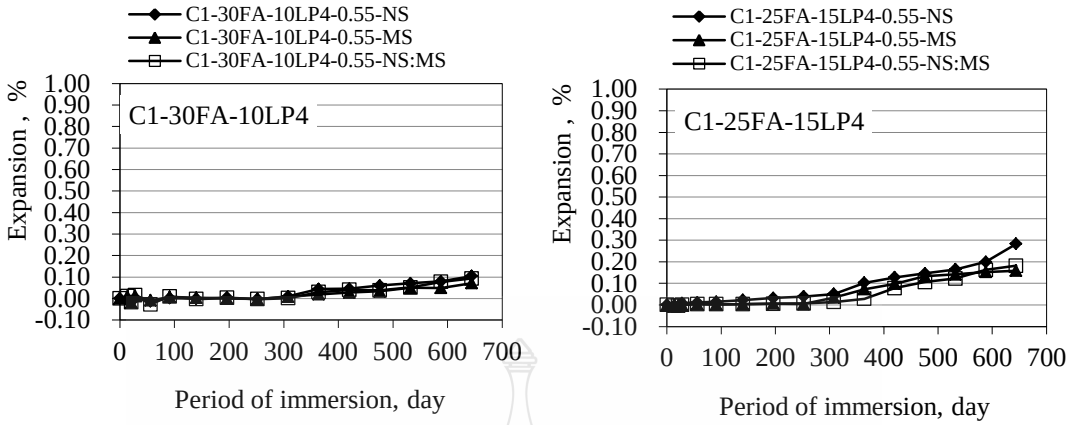


ก) เถ้าลอยร้อยละ 30 ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10



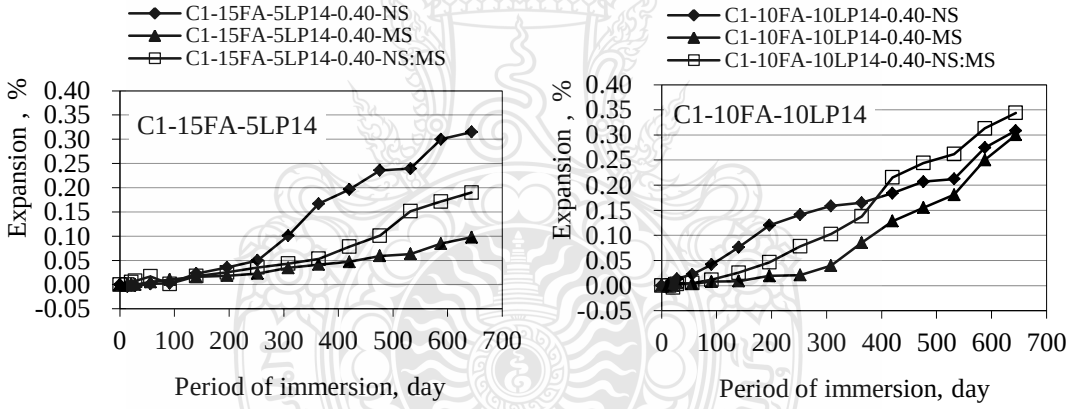
ข) เถ้าลอยร้อยละ 25 ฝุ่นหินปูนร้อยละ 15

ภาพที่ 4.60 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



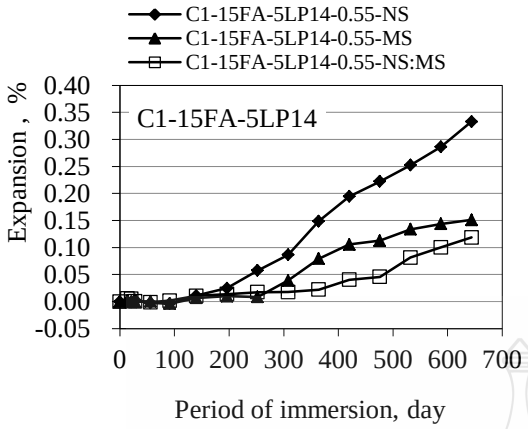
ก) เถ้าลอยร้อยละ 30 ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10 ข) เถ้าลอยร้อยละ 25 ฝุ่นหินปูนร้อยละ 15

ภาพที่ 4.61 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

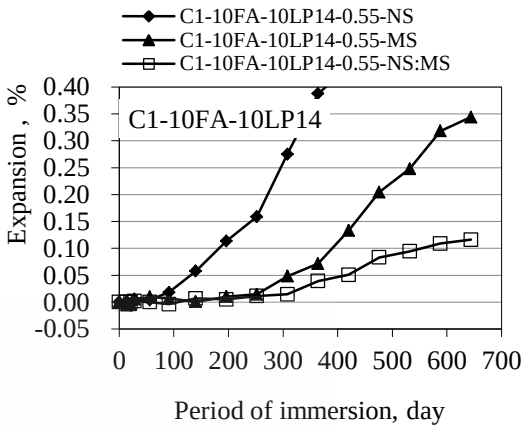


ก) เถ้าลอยร้อยละ 15 ฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 ข) เถ้าลอยร้อยละ 10 ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 4.62 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

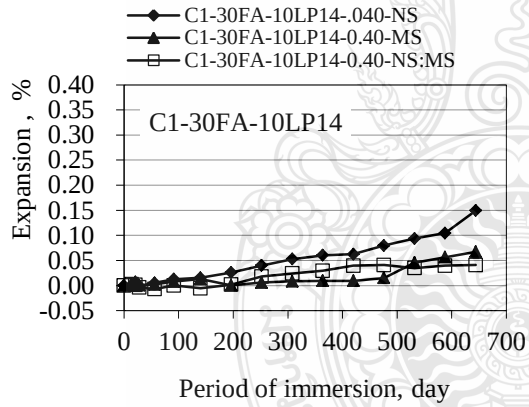


ก) เถ้าลอยร้อยละ 15 ฝุ่นหินปูนร้อยละ 5

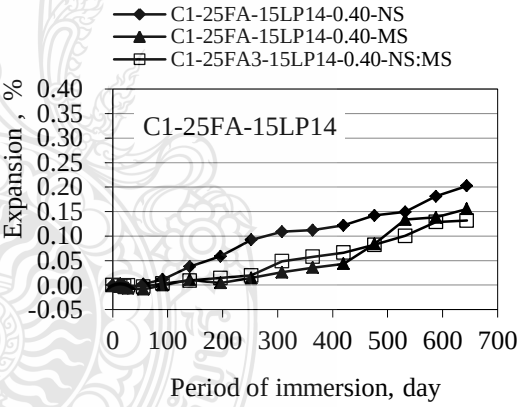


ข) เถ้าลอยร้อยละ 10 ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 4.63 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

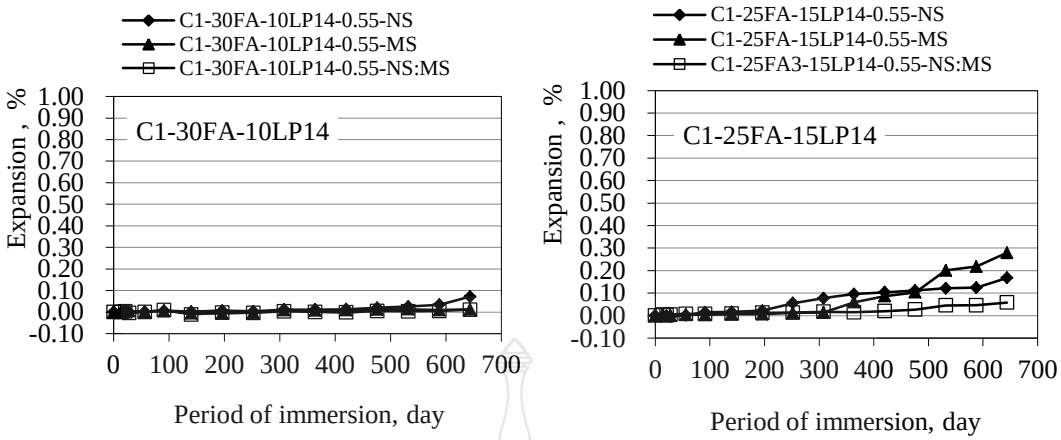


ก) เถ้าลอยร้อยละ 30 ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10



ข) เถ้าลอยร้อยละ 25 ฝุ่นหินปูนร้อยละ 15

ภาพที่ 4.64 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ก) เถ้าลอยร้อยละ 30 ฝุ่นหินปูนร้อยละ 10 ข) เถ้าลอยร้อยละ 25 ฝุ่นหินปูนร้อยละ 15

ภาพที่ 4.65 เปรียบเทียบผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) ร่วมกับเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

ภาพที่ 4.66 ถึง 4.68 แสดงภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ ที่อายุ 364 วัน (52 สัปดาห์) จากการแช่ในสารละลายซัลเฟต ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบลักษณะของการทำลายของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต และโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ลักษณะการถูกทำลายของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์จะแตกต่างกัน กล่าวคือ ชิ้นตัวอย่างในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะมีลักษณะที่เสื่อมสภาพของผิวชิ้นตัวอย่าง เนื่องจากกลไกการทำลายจะไปลดความยึดประสานของโครงสร้างของเพสต์ ไม่เหมือนกับกรณีของโซเดียมซัลเฟตซึ่งจะทำให้เกิด Ettringite ในโครงสร้างของเพสต์ผลทำให้เกิดการขยายตัวในชิ้นตัวอย่าง ดังกลไกที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วนในกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต ในอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนักนั้น จะเห็นได้ว่าลักษณะของชิ้นตัวอย่างที่ถูกทำลายนั้นจะมีลักษณะระหว่างของโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต แต่แนวโน้มการทำลายนั้นจะไปในลักษณะของกลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตมากกว่า กล่าวคือในสารละลายที่ผสมกันดังกล่าว แมกนีเซียมมีแนวโน้มว่าจะมีศักยภาพมากกว่า โดยที่ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ไม่มีลักษณะที่จะขยายตัวหรืองอ

Na_2SO_4 $MgSO_4$ Na_2SO_4+ $MgSO_4$ (3:1)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C1)

Na_2SO_4 $MgSO_4$ Na_2SO_4+ $MgSO_4$ (3:1)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน (C5)

ภาพที่ 4.66 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 364 วัน (52 สัปดาห์)

Na_2SO_4 $MgSO_4$ Na_2SO_4+ $MgSO_4$ (3:1)

แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน 4 ไมโครเมตรร้อยละ 5 (C1-5LP4)

Na_2SO_4 $MgSO_4$ Na_2SO_4+ $MgSO_4$ (3:1)

แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 (C1-20FA)

ภาพที่ 4.67 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นหินปูนหินขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตรร้อยละ 5 และเถ้าลอยร้อยละ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 364 วัน (52 สัปดาห์)

Na_2SO_4 $MgSO_4$ Na_2SO_4+ $MgSO_4$ (3:1)

แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 และฝุ่นหินปูนร้อยละ 5 (C1-15FA-5LP4)

Na_2SO_4 $MgSO_4$ Na_2SO_4+ $MgSO_4$ (3:1)

แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และฝุ่นหินปูนร้อยละ 10 (C1-30FA-10LP4)

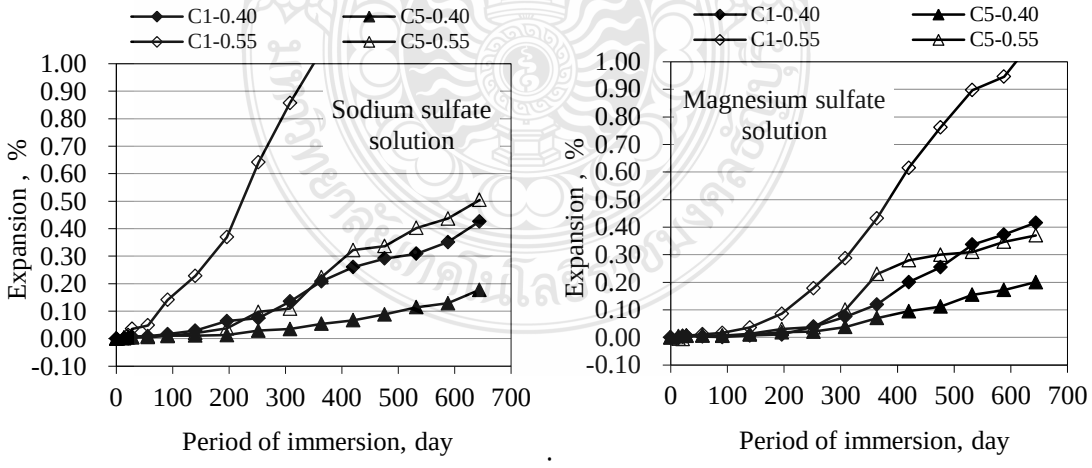
ภาพที่ 4.68 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 ไมโครเมตรร้อยละ 5 และร้อยละ 10 และเถ้าลอยร้อยละ 15 และร้อยละ 30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 364 วัน (52 สัปดาห์)

4.2.4 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

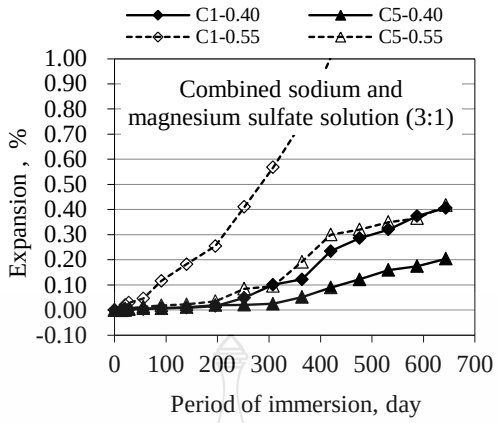
สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 2 อัตราส่วน คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับสารละลายแมกนีเซียมในอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก ดังนั้นในการประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยวัดการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์นั้น จึงได้พิจารณาถึงผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในแต่ละชนิดของสารละลายซัลเฟตทั้ง 3 กรณี ที่มีผลต่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) กรณีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน

ภาพที่ 4.69 แสดงเปรียบเทียบระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 กับอายุการแช่ในสารละลายซัลเฟตทั้ง 3 ชนิด (สารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับสารละลายแมกนีเซียมในอัตราส่วน 3:1) พบว่าทุกกรณีของการแช่ในสารละลายซัลเฟตดังกล่าวนั้น ค่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 มีค่ามากกว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ทั้งนี้เพราะการใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมมอร์ต้าร์มากจะทำให้มีค่าความพรุนมากกว่าเมื่อใช้ปริมาณน้ำน้อยกว่า มีผลทำให้สารละลายซัลเฟตเข้าไปทำลายได้มากขึ้นจึงทำให้ค่าการขยายตัวมีค่ามากกว่า



ก) สารละลายโซเดียมซัลเฟต ข) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



ค) สารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)

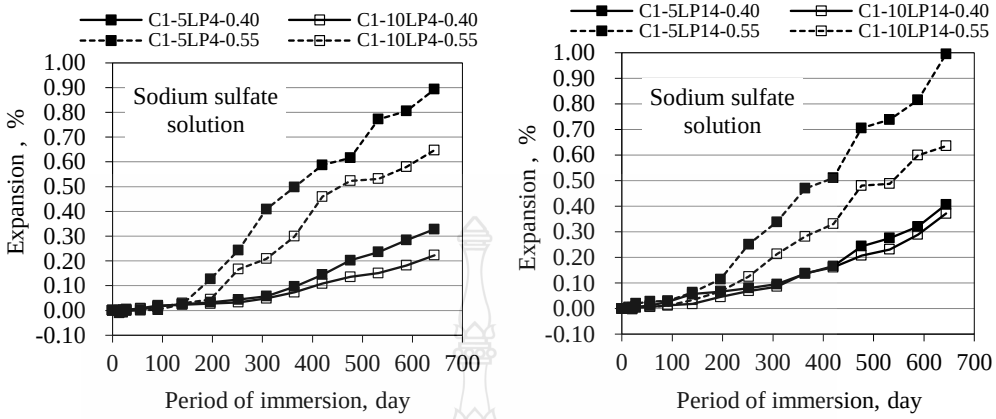
ภาพที่ 4.69 เปรียบเทียบผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการขยายตัวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)

2) กรณีวัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

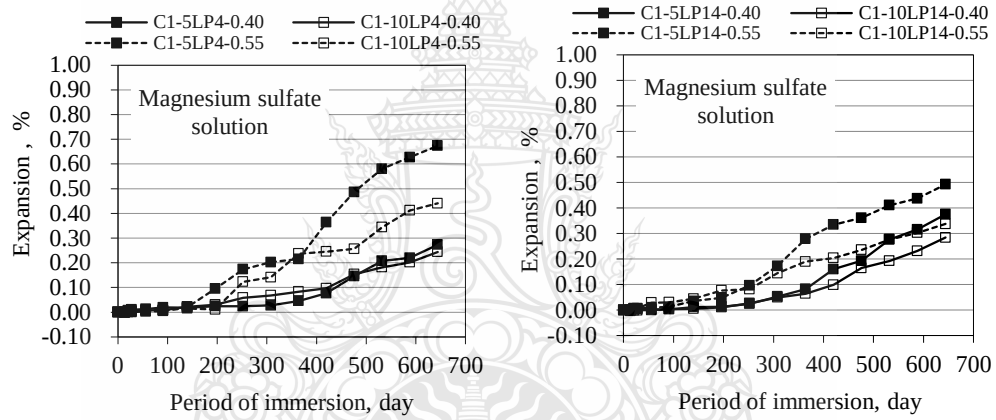
จากภาพที่ 4.70 แสดงเปรียบเทียบระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนทั้งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตรร้อยละ 5 และร้อยละ 10 และเถ้าลอยร้อยละ 20 และร้อยละ 40 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 พบว่าในตัวอย่างมอร์ต้าร์ทุกกรณีที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 มีค่าการขยายตัวที่มากกว่าของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ทั้งนี้เพราะความพรุนที่มีมากกว่าในตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากกว่า 0.55 จึงทำให้สารละลายซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ง่ายกว่าส่งผลให้การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังกล่าวมีค่ามากกว่า ซึ่งเป็นในทำนองเดียวกันกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

อย่างไรก็ตามในกรณีของตัวอย่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยจะเห็นว่าการขยายตัวของตัวอย่างระหว่างเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 มีค่าไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เพราะการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยมีค่าค่อนข้างน้อย ทั้งในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 จึงทำให้ไม่เห็นถึงความแตกต่างของการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังกล่าว นั่นแสดงว่า

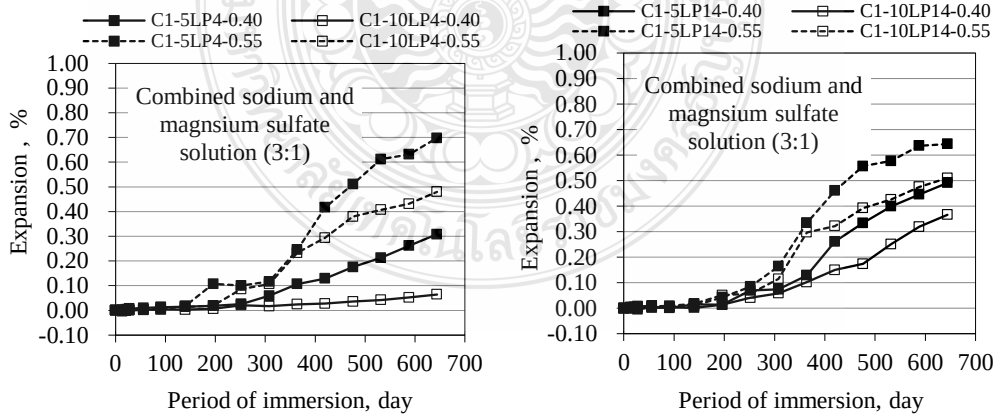
ในกรณีมอร์ต้าร์ดังกล่าวผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานค่าการขยายตัวมีค่าไม่แตกต่างหรือมีค่าค่อนข้างน้อยนั่นเอง



สารละลายโซเดียมซัลเฟต

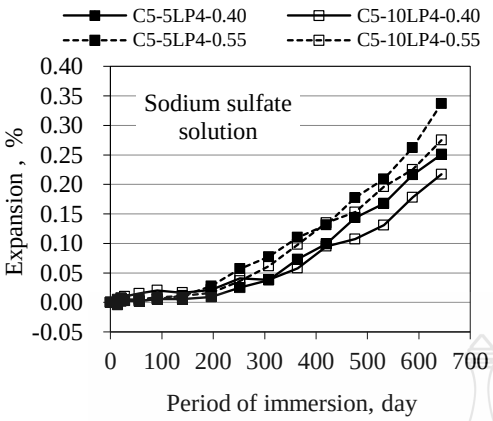


สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

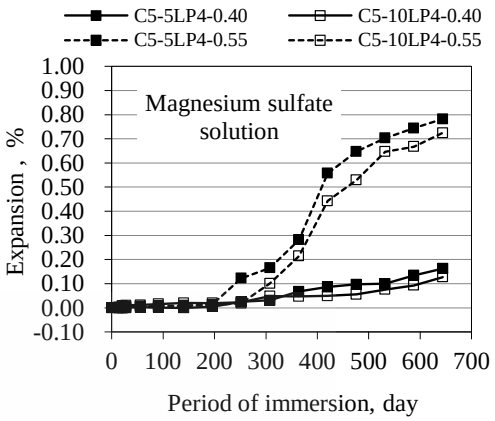


สารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)

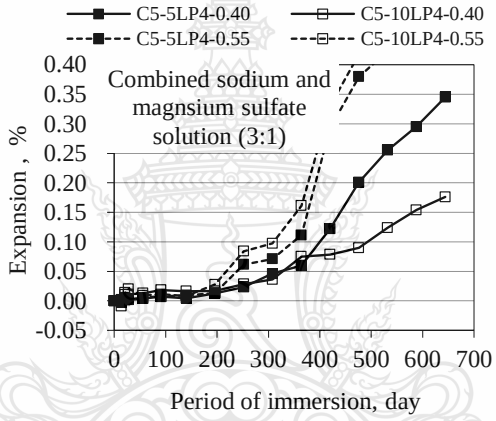
ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร ร้อยละ 5 และร้อยละ 10



สารละลายโซเดียมซัลเฟต

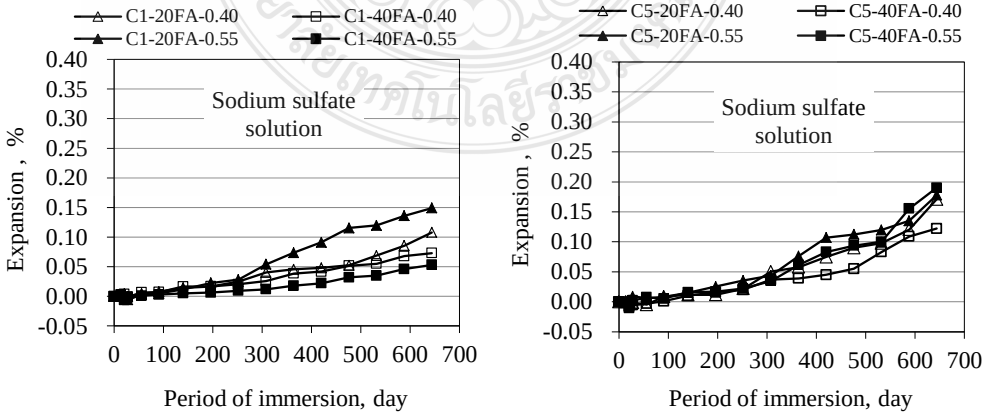


สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

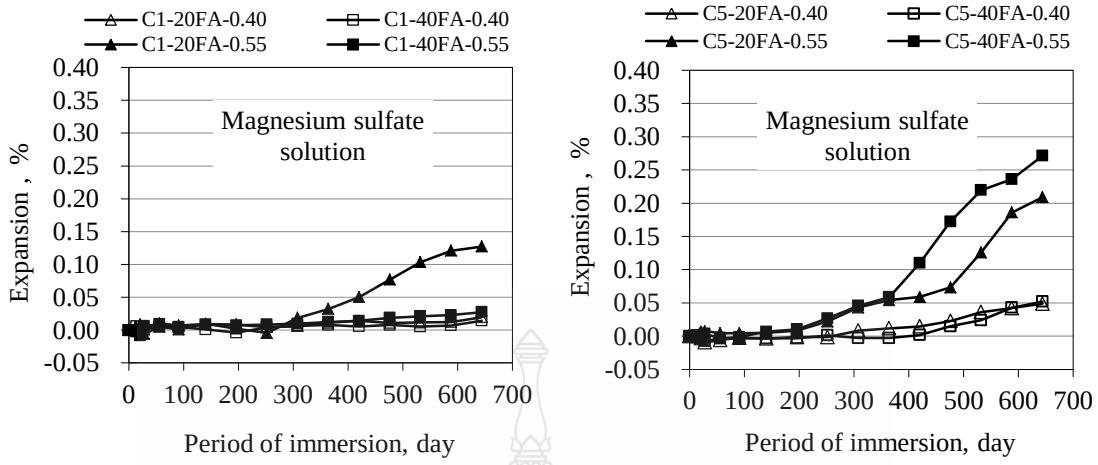


สารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)

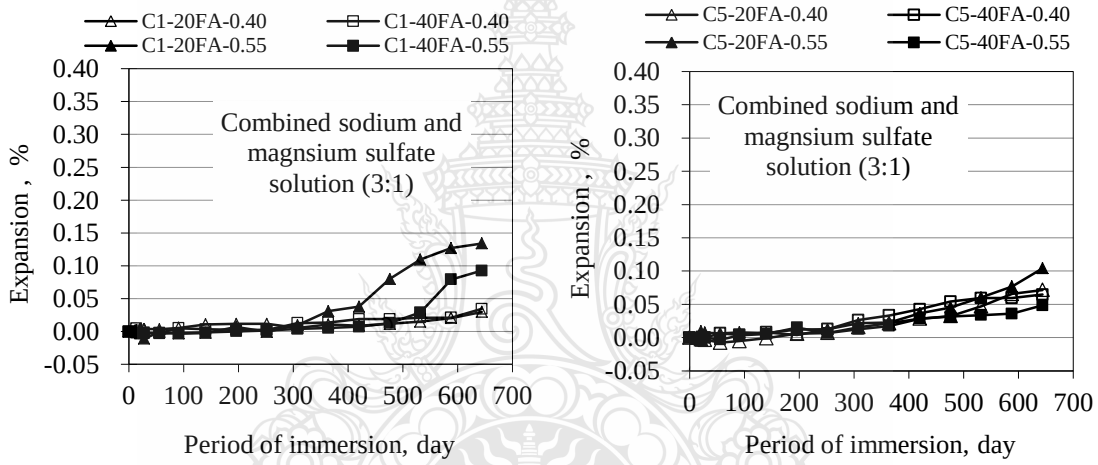
ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร ร้อยละ 5 และร้อยละ 10



สารละลายโซเดียมซัลเฟต



สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



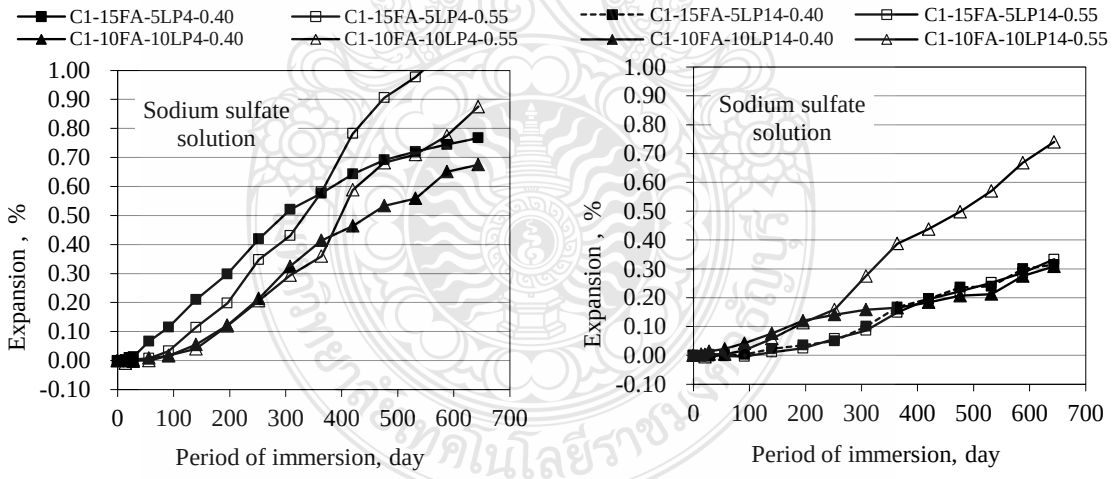
สารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)

ค) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และร้อยละ 40

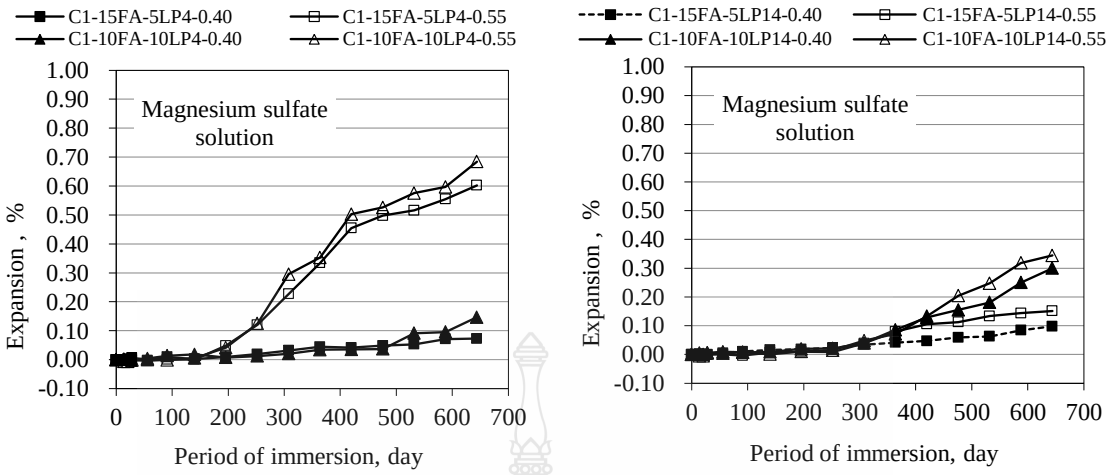
ภาพที่ 4.70 เปรียบเทียบผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร และแทนที่ด้วยเถ้าลอย ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)

3) กรณีวัสดุประสานร่วมสามชนิด (Ternary) แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

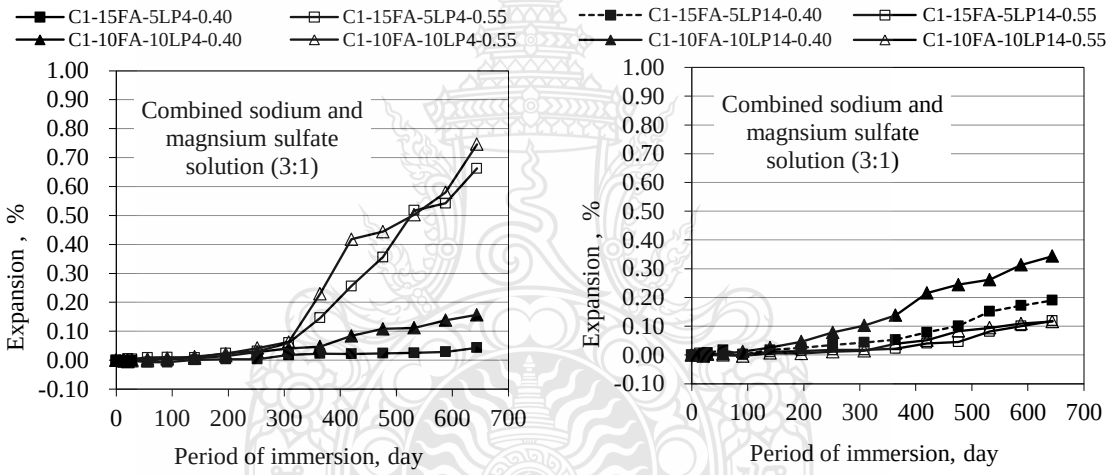
ภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการแช่ในสารละลายซัลเฟตทั้ง 3 ชนิด (สารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับสารละลายแมกนีเซียมในอัตราส่วน 3:1) กับการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตรร่วมกับเถ้าลอย เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของตัวอย่างมอร์ต้าร์เท่ากับ 0.40 และ 0.55 พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมาก (0.55) มีค่ามากกว่าของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อย (0.40) ทั้งนี้เหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว และเช่นเดียวกันในกรณีที่ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าน้อย พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ระหว่างเมื่อใช้น้ำมากกับน้ำน้อยมีค่าไม่แตกต่างกันหรือแตกต่างกันน้อยมาก แต่แนวโน้มการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อใช้น้ำมากมีค่ามากกว่าเมื่อใช้น้ำน้อย แสดงว่าผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีน้อยหรือไม่มีต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตนั่นเอง



สารละลายโซเดียมซัลเฟต

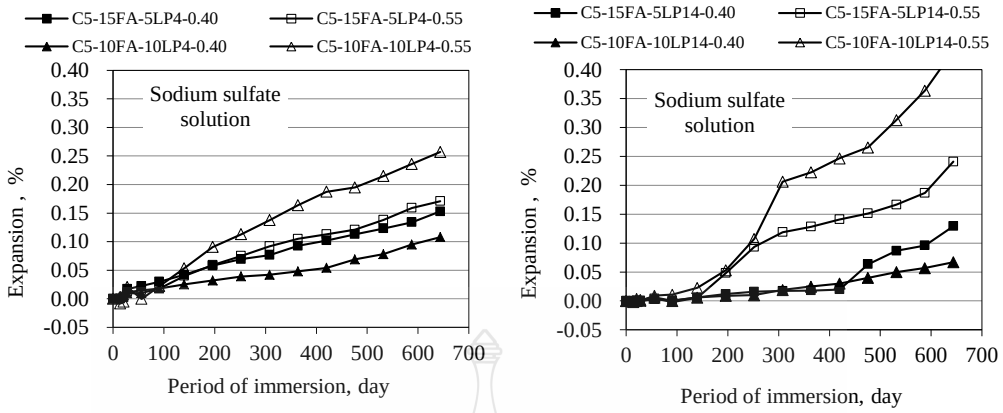


สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

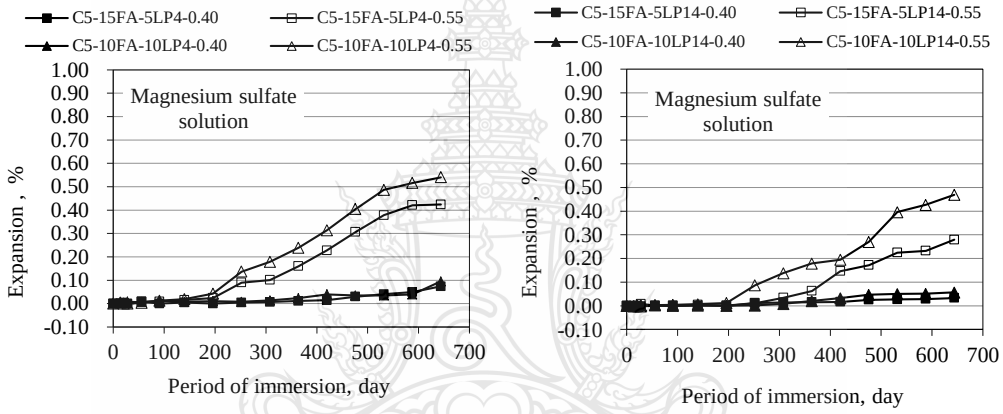


สารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)

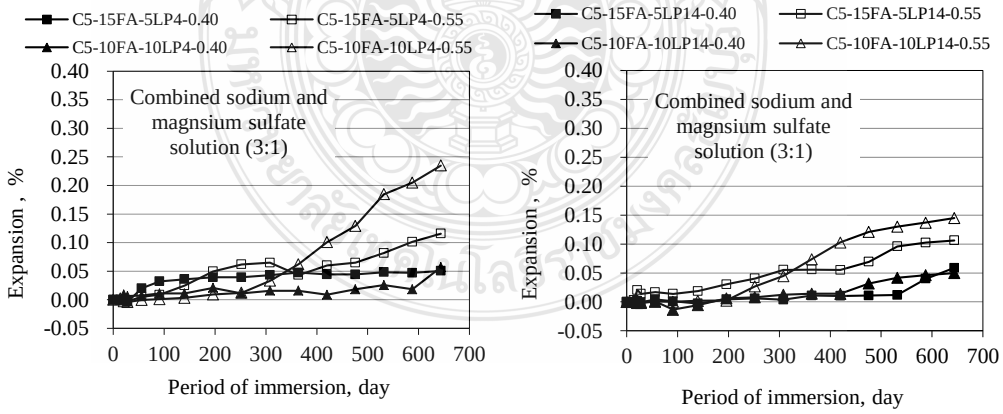
ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร ร่วมกับเถ้าลอย



สารละลายโซเดียมซัลเฟต

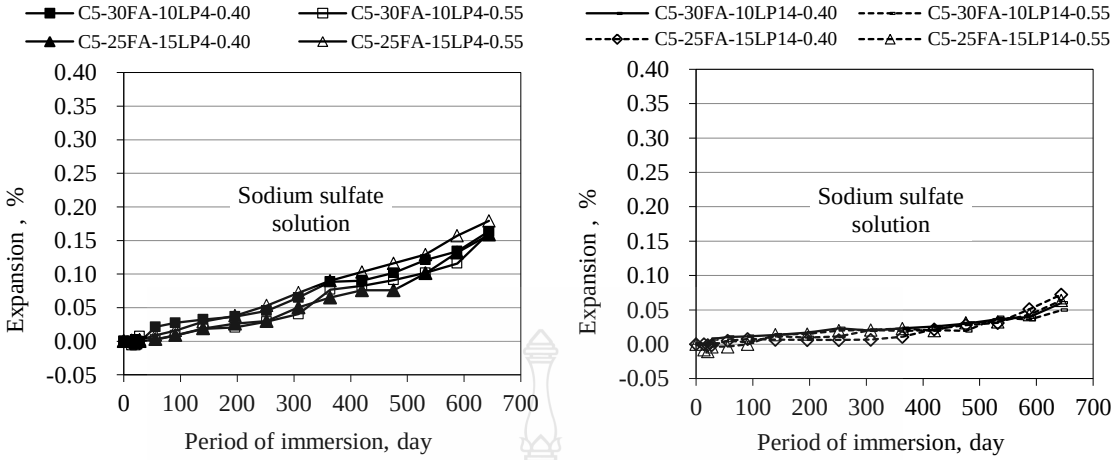


สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

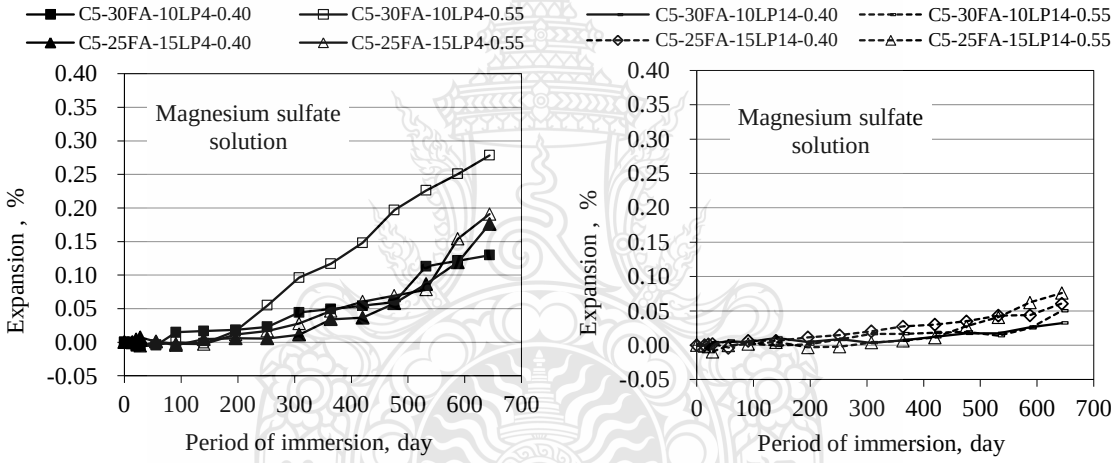


สารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)

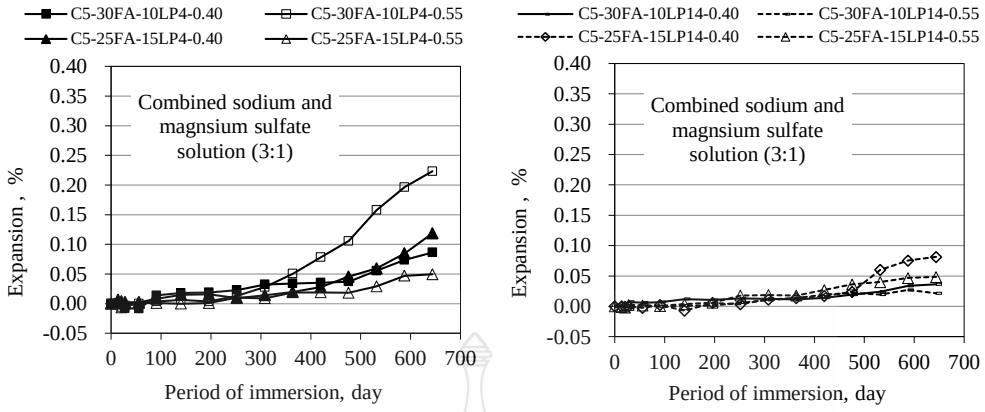
ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร ร่วมกับเถ้าลอย



สารละลายโซเดียมซัลเฟต



สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



สารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)

ค) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร ร่วมกับเถ้าลอย

ภาพที่ 4.71 เปรียบเทียบผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตรร่วมกับเถ้าลอย ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)

4.3 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต

ในการประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยการวัดการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 5×5×5 เซนติเมตร ซึ่งได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยดังนี้ ผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน ผลกระทบของความละเอียดของฝุ่นหินปูน และผลกระทบของชนิดของสารละลายซัลเฟตต่อการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.3.1 ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการสูญเสียน้ำหนัก

สำหรับชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน ที่ใช้พิจารณาถึงผลกระทบต่อการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตนั้น ใช้เหมือนกับกรณีของการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร) และเถ้าลอย โดยการแทนที่

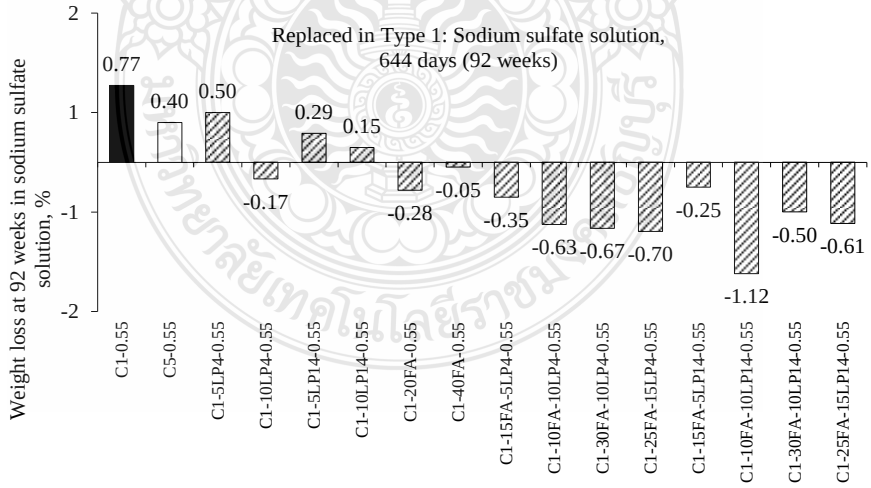
นั้นใช้เหมือนกรณีของการขยายตัวทุกประการ

1) กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

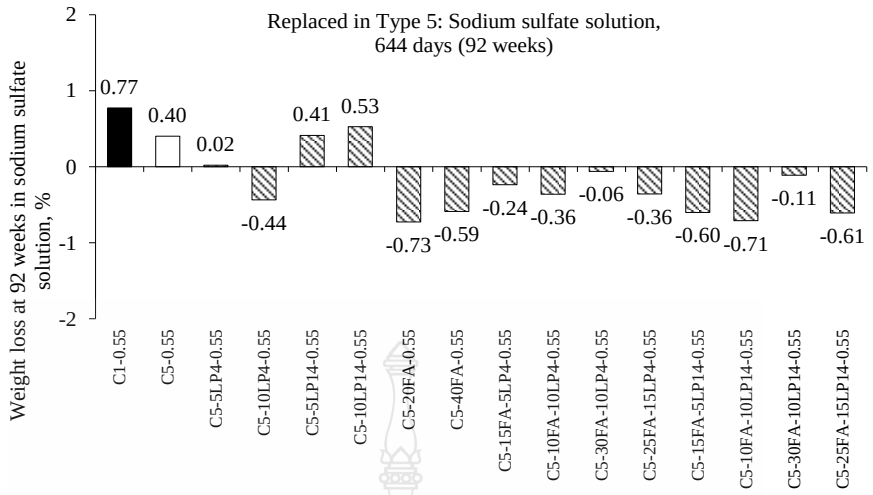
ภาพที่ 4.72 และภาพที่ 4.73 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร แทนที่ด้วยเถ้าลอย และทั้งแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 644 วัน

สำหรับกรณีการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่ฝุ่นหินปูน และเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน (ภาพที่4.72) พบว่า การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าไม่แตกต่างกัน หรือก็แตกต่างกันน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในแต่ละสัดส่วน และในบางสัดส่วนของมอร์ต้าร์พบว่าน้ำหนักกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการทำลายมิได้เป็นการทำให้สูญเสียเนื้อเพสต์ไป จึงทำให้ไม่เห็นข้อแตกต่างของค่าการสูญเสียน้ำหนัก ส่วนเมื่อแทนที่ฝุ่นหินปูน และเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ภาพที่4.73) ก็ให้ผลในทิศทางเดียวกัน

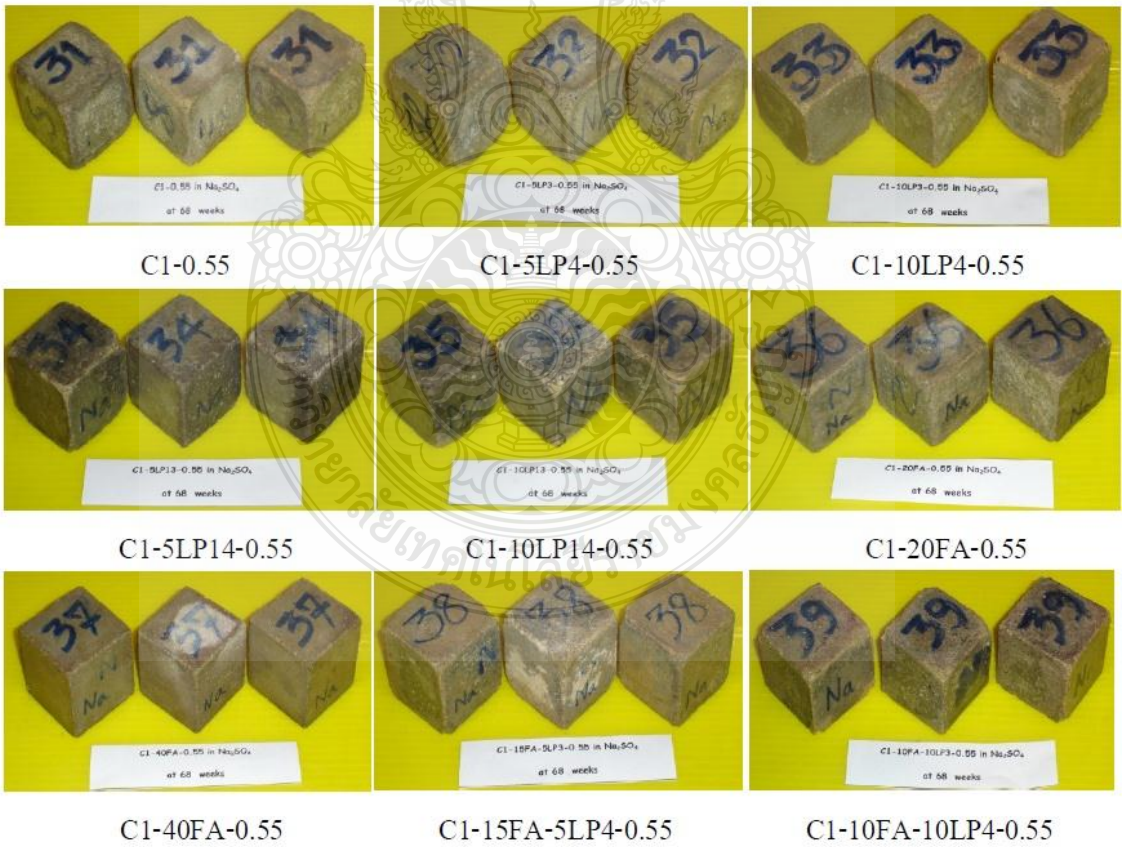
ภาพที่ 4.74 และ 4.75 แสดงภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์) ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ก็ให้ผลสอดคล้องกับการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์จากที่กล่าวมาแล้ว (ภาพที่ 4.72 และ 4.73)



ภาพที่ 4.72 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 644 วัน



ภาพที่ 4.73 เปรียบเทียบการการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 644 วัน



C1-30FA-10LP4-0.55 C1-25FA-15LP4-0.55 C1-15FA-5LP14-0.55

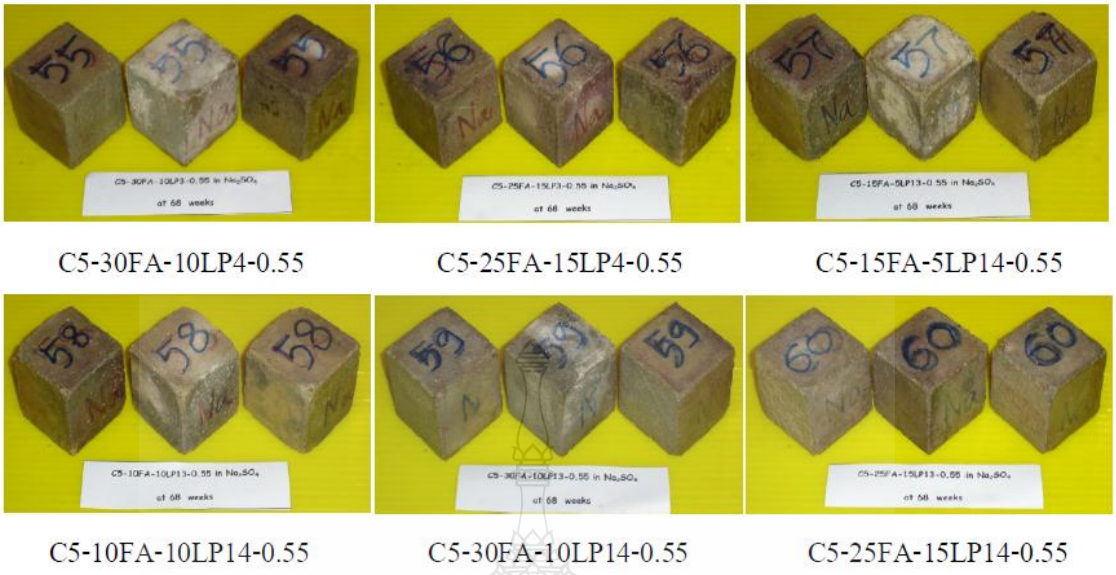
C1-10FA-10LP14-0.55 C1-30FA-10LP14-0.55 C1-25FA-15LP14-0.55

ภาพที่ 4.74 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)

C5-0.55 C5-5LP4-0.55 C5-10LP4-0.55

C5-5LP14-0.55 C5-10LP14-0.55 C5-20FA-0.55

C5-40FA-0.55 C5-15FA-5LP4-0.55 C5-10FA-10LP4-0.55



ภาพที่ 4.75 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)

2) กรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

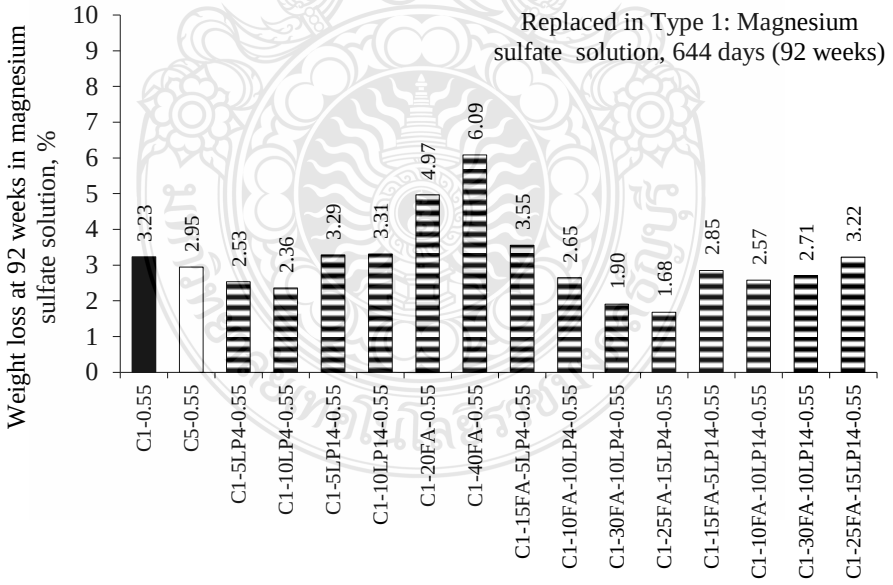
ภาพที่ 4.76 และ 4.77 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร แทนที่ด้วยเถ้าลอย และทั้งแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอย เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 644 วัน

สำหรับกรณีการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่ฝุ่นหินปูน และเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับเมื่อเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน (การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนมีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วนทั้งนี้เพราะปริมาณ C_3A ที่มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) ภาพที่ 4.76 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ของการแทนที่ฝุ่นหินปูน (ทั้งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นั้นมีค่าไม่แตกต่างหรือมีแนวโน้มว่าจะน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน (ทั้งประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5) ทั้งนี้เพราะฝุ่นหินปูนเข้าไปช่วยในการเติมเต็มในซีเมนต์เพสต์

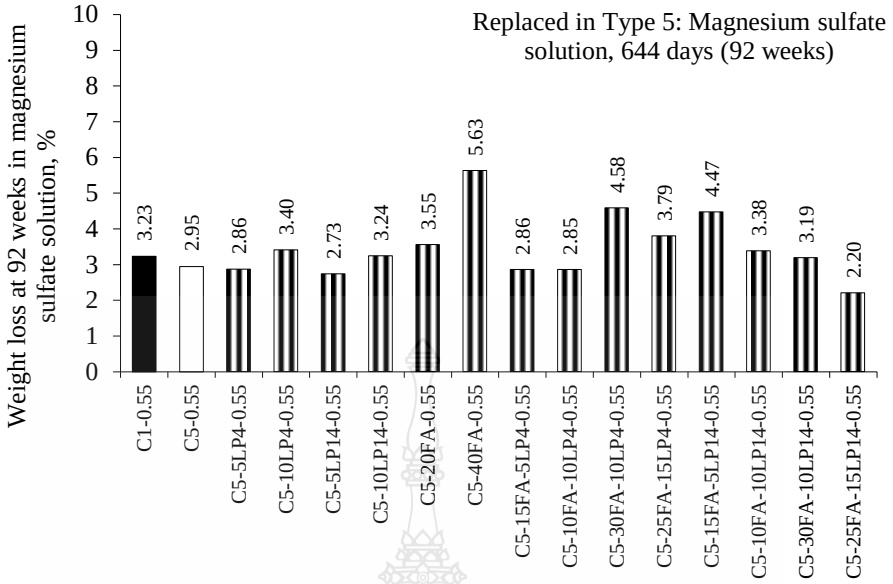
ทำให้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าทำลายได้ยากขึ้น จึงทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่า แต่ในกรณีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นั้น จะเห็นได้ชัดเจนว่า การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์มากกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ล้วนและที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน (ทั้งร้อยละ 5 และร้อยละ 10) ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเป็นการลดความเป็นด่างในมอร์ต้าร์ (ลด $Ca(OH)_2$ จึงทำให้ไม่มีความเสถียรภาพในมอร์ต้าร์ทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน จึงทำให้มีการสูญเสียน้ำหนักในตัวอย่างมีมาก แต่เมื่อมีการแทนที่ทั้งฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กลับพบว่ามีค่าการสูญเสียน้ำหนักใกล้เคียงหรือมีแนวโน้มต่ำกว่าของกรณีตัวอย่างปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้เพราะช่วยเติมเต็มช่องว่างของฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยนั่นเอง

ส่วนเมื่อแทนที่ฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประภทที่ 5 (ภาพที่4.77) ก็ให้ผลการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ในทิศทางเดียวกันกับกรณีแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังที่กล่าวมาแล้ว

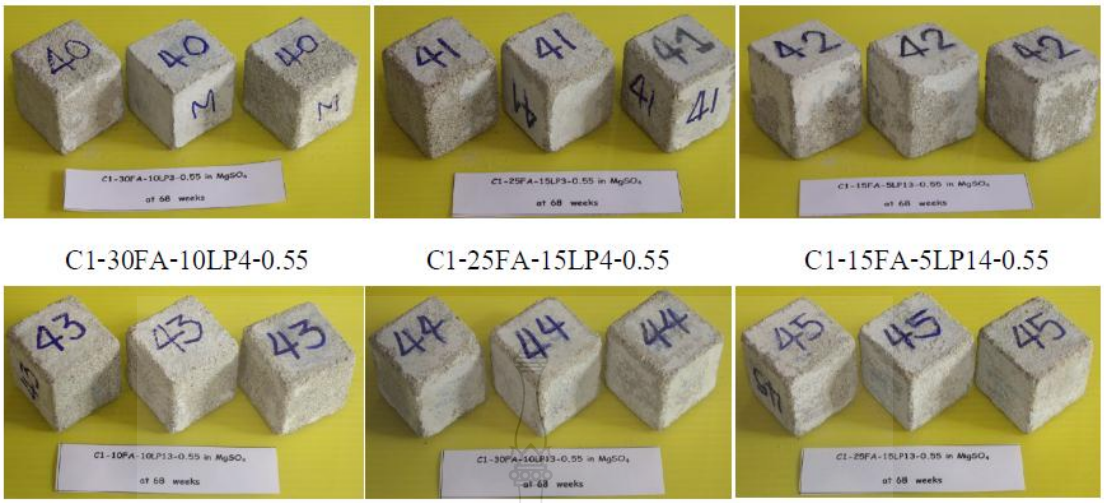
ภาพที่ 4.78 และ 4.79 แสดงภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์) ในการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าสอดคล้องกับการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ภาพที่ 4.76 และ 4.77)



ภาพที่ 4.76 เปรียบเทียบการการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 644 วัน



ภาพที่ 4.77 เปรียบเทียบการการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 644 วัน



C1-30FA-10LP4-0.55 C1-25FA-15LP4-0.55 C1-15FA-5LP14-0.55

C1-10FA-10LP14-0.55 C1-30FA-10LP14-0.55 C1-25FA-15LP14-0.55

ภาพที่ 4.78 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)

C5-0.55 C5-5LP4-0.55 C5-10LP4-0.55

C5-5LP14-0.55 C5-10LP14-0.55 C5-20FA-0.55

C5-40FA-0.55 C5-15FA-5LP4-0.55 C5-10FA-10LP4-0.55

C5-30FA-10LP4-0.55 C5-25FA-15LP4-0.55 C5-15FA-5LP14-0.55

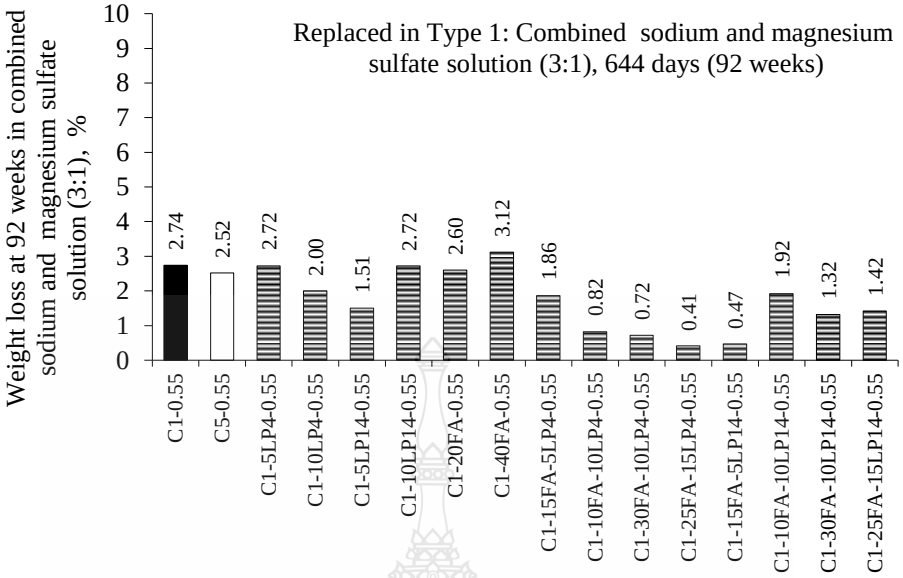
C5-10FA-10LP14-0.55 C5-30FA-10LP14-0.55 C5-25FA-15LP14-0.55

ภาพที่ 4.79 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)

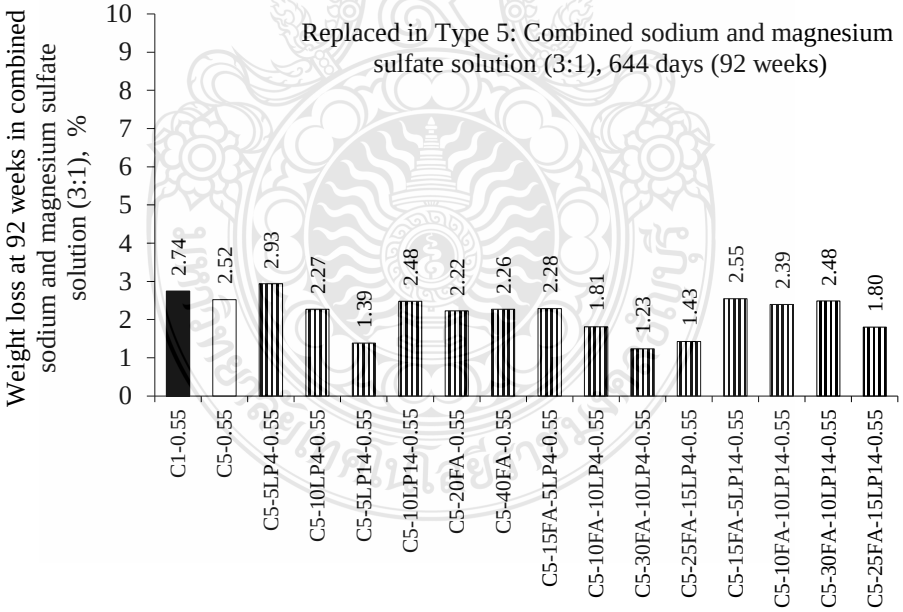
3) กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)

ภาพที่4.80 และภาพที่4.81 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และทั้งแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) 644 วัน พบว่า การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ให้ผลในทิศทางเดียวกันกับกรณีในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต กล่าวคือในกรณีแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนอย่างเดียวหรือเถ้าลอยอย่างเดียว หรือทั้งฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยให้ผลของการสูญเสียน้ำหนักมีค่าน้อยกว่าเมื่อไม่มีการแทนที่ เหตุผลดังกล่าวได้กล่าวมาแล้ว

ภาพที่ 4.82 และ 4.83 แสดงภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์) ในการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องกับการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) (ภาพที่ 4.80 และ 4.81)



ภาพที่ 4.80 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) 644 วัน



ภาพที่ 4.81 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) 644 วัน

ภาพที่ 4.82 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)

ภาพที่ 4.83 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)

4.3.2 ผลกระทบจากความละเอียดของฝุ่นหินปูนต่อการสูญเสียน้ำหนัก

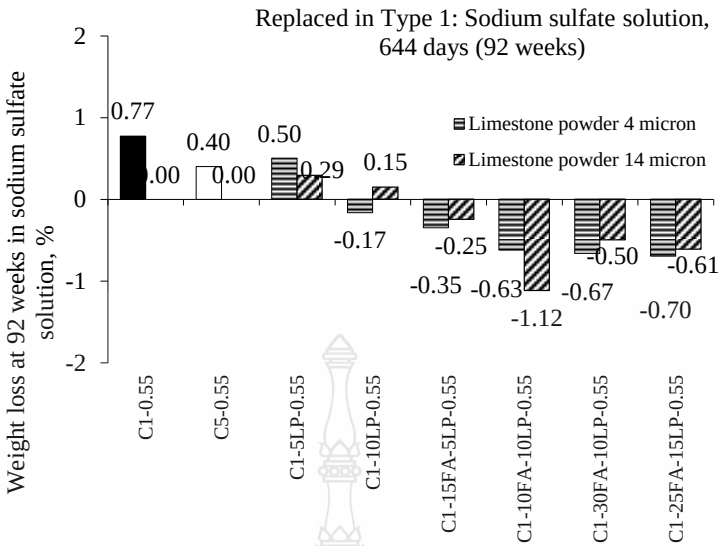
สำหรับฝุ่นหินปูนที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ ได้ใช้ฝุ่นหินปูนที่มีความละเอียดเฉลี่ยของอนุภาคขนาด 4 และขนาด 14 ไมโครเมตร ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากความละเอียดของฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และขนาด 14 ไมโครเมตร ต่อการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตนั้น มีรายละเอียดดังนี้

1) กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

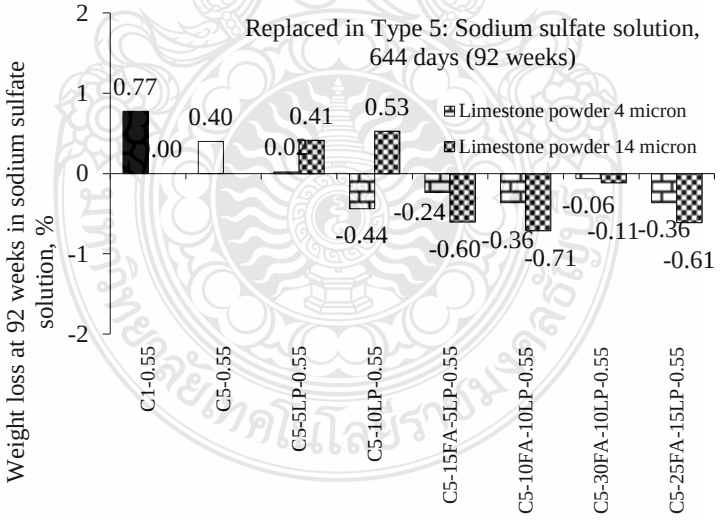
ภาพที่ 4.84 และ 4.85 แสดงการเปรียบเทียบการการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน และทั้งแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 644 วัน

สำหรับกรณีการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่ด้วยระหว่างฝุ่นหินปูนขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร ทั้งที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนอย่างเดียวหรือแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 (ภาพที่4.84) พบว่าการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนระหว่างความละเอียดขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14ไมโครเมตร นั้นจะเห็นได้ว่าผลของความละเอียดของฝุ่นหินปูน (ระหว่างขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร) ต่อการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์แตกต่างกันไม่มาก และสลับกันมากบ้างน้อยบ้างไม่แน่นอน นั่นก็แสดงว่าความละเอียดของฝุ่นหินปูน (ระหว่างขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร) นั้นให้ผลไม่ค่อยชัดเจนต่อผลกระทบต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต อย่างไรก็ตามความละเอียดของฝุ่นหินปูนน่าจะมีผลกระทบต่อการต้านทานซัลเฟต ดังนั้นเพื่อความชัดเจนจึงน่าจะมีการศึกษาทดลองเพิ่มเติมต่อไป

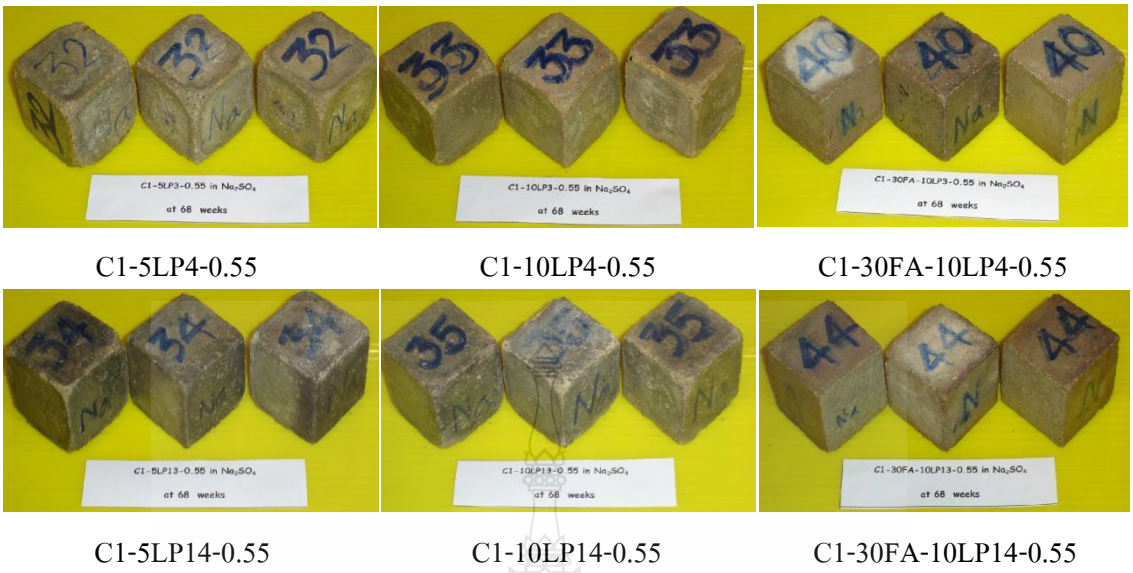
ภาพที่ 4.86 แสดงภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์) ในการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ซึ่งก็ไม่สามารถเห็นถึงข้อแตกต่างจากภาพถ่ายได้ ที่เกิดจากผลของความละเอียดของฝุ่นหินปูนระหว่างขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.84 เปรียบเทียบการการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน และฝุ่นหินปูนผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 644 วัน



ภาพที่ 4.85 เปรียบเทียบการการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน และฝุ่นหินปูนผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 644 วัน



C1-5LP4-0.55 C1-10LP4-0.55 C1-30FA-10LP4-0.55

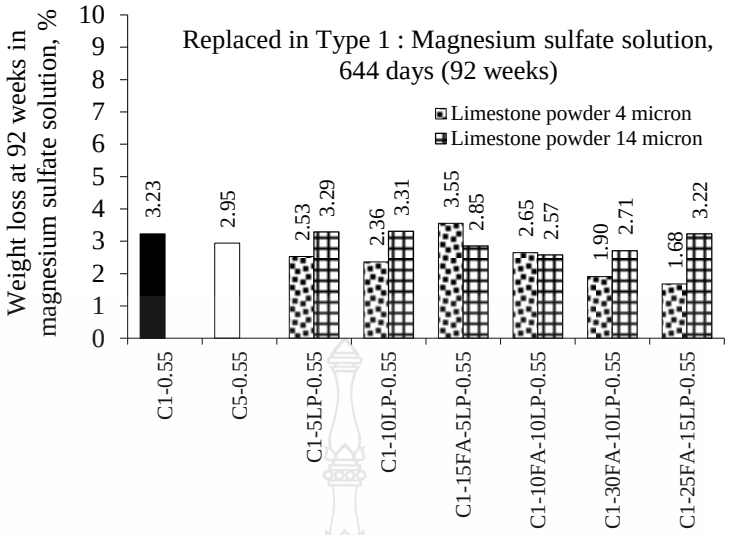
C1-5LP14-0.55 C1-10LP14-0.55 C1-30FA-10LP14-0.55

ภาพที่ 4.86 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน และแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)

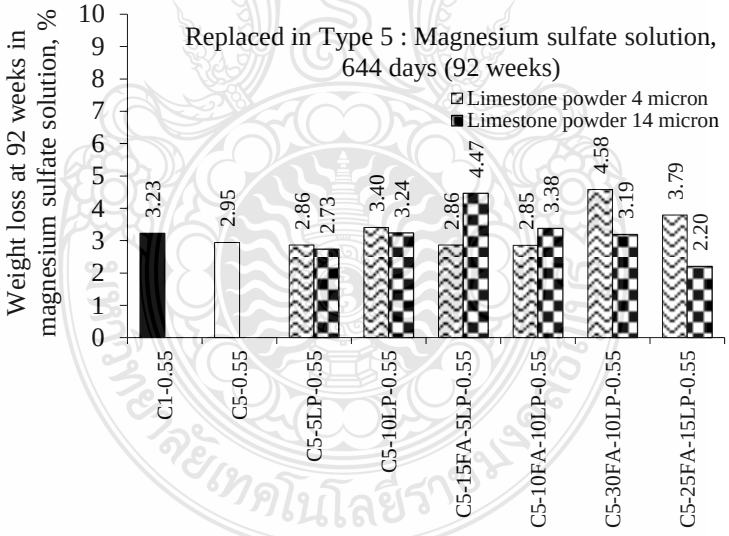
2) กรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.87 แล 4.88 แสดงการเปรียบเทียบการการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน และทั้งแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 644 วัน ซึ่งก็จะให้ผลในทิศทางเดียวกับกรณีในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ถึงแม้ว่าขนาดการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างจะมีขนาดที่มากขึ้นก็ตาม จะเห็นได้ว่าผลของความละเอียดของฝุ่นหินปูน (ระหว่างขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร) ต่อการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์แตกต่างกันไม่มากและสลับกันมากบ้างน้อยบ้างไม่แน่นอน นั่นก็แสดงว่าความละเอียดของฝุ่นหินปูน (ระหว่างขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร) นั้นให้ผลไม่ค่อยชัดเจนต่อผลกระทบต่อการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต อย่างไรก็ตามความละเอียดของฝุ่นหินปูนน่าจะมีผลกระทบต่อการต้านทานซัลเฟต ดังนั้นเพื่อความชัดเจนเห็นควรจะต้องมีการศึกษาทดลองเพิ่มเติมต่อไป

ภาพที่ 4.89 แสดงภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์) ในการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ก็ให้ผลที่สอดคล้องกับกรณีการสูญเสียน้ำหนัก (ภาพที่ 4.87 และ 4.88)



ภาพที่ 4.87 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียม 644 วัน



ภาพที่ 4.88 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียม 644 วัน

C1-5LP4-0.55 C1-10LP4-0.55 C1-25FA-15LP4-0.55

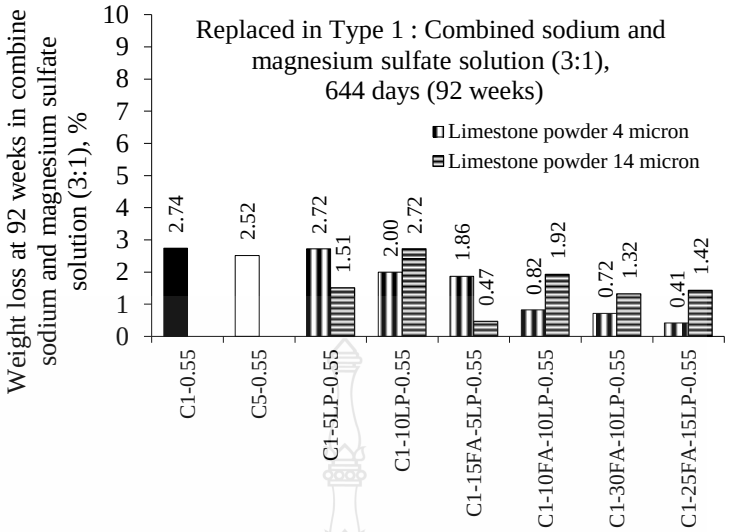
C1-5LP14-0.55 C1-10LP14-0.55 C1-25FA-15LP14-0.55

ภาพที่ 4.89 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)

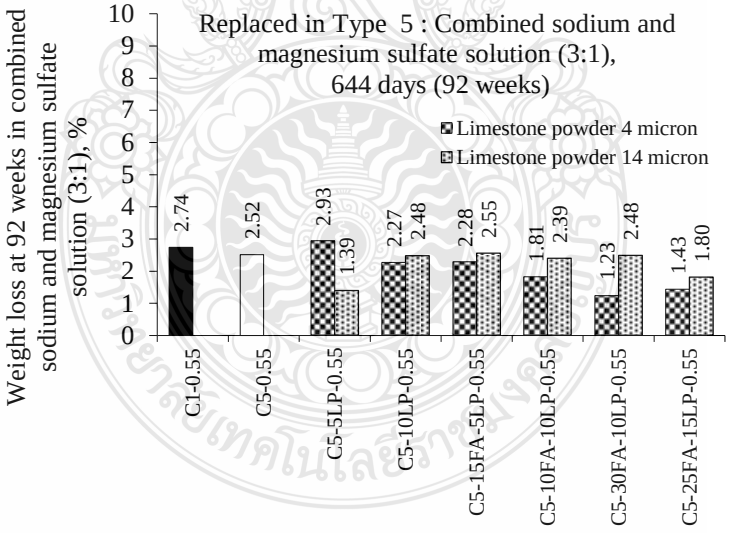
3) กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)

ภาพที่ 4.90 และ 4.91 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน และทั้งแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) 644 วัน ผลก็ให้ในทิศทางหรือแนวโน้มเดียวกับกรณีของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต กล่าวคือความละเอียดของฝุ่นหินปูน (ระหว่างขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร) นั้นให้ผลไม่ค่อยชัดเจนต่อผลกระทบต่อการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) อย่างไรก็ตามความละเอียดของฝุ่นหินปูนน่าจะมีผลกระทบต่อการต้านทานซัลเฟต ดังนั้นเพื่อความชัดเจนเห็นควรจะต้องมีการศึกษาทดลองเพิ่มเติมต่อไป

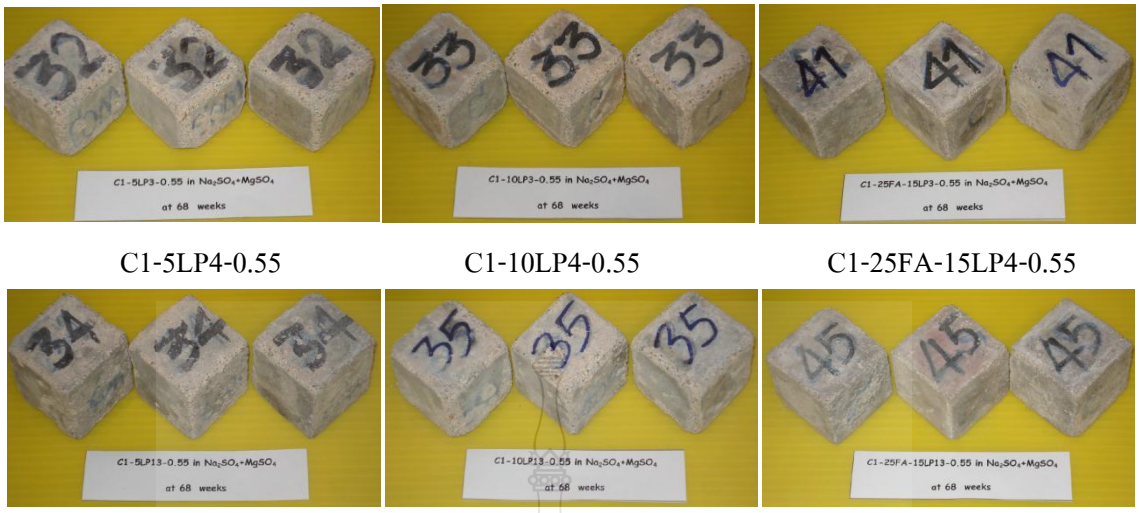
ภาพที่ 4.92 แสดงภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์) ในการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ก็ให้ผลที่สอดคล้องกับกรณีการสูญเสียน้ำหนัก (ภาพที่ 4.90 และ 4.91)



ภาพที่ 4.90 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน และแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนผสมเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) 644 วัน



ภาพที่ 4.91 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน และแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนผสมเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) 644 วัน



C1-5LP4-0.55 C1-10LP4-0.55 C1-25FA-15LP4-0.55

C1-5LP14-0.55 C1-10LP14-0.55 C1-25FA-15LP14-0.55

ภาพที่ 4.92 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)

4.3.3 ผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟตต่อการสูญเสียน้ำหนัก

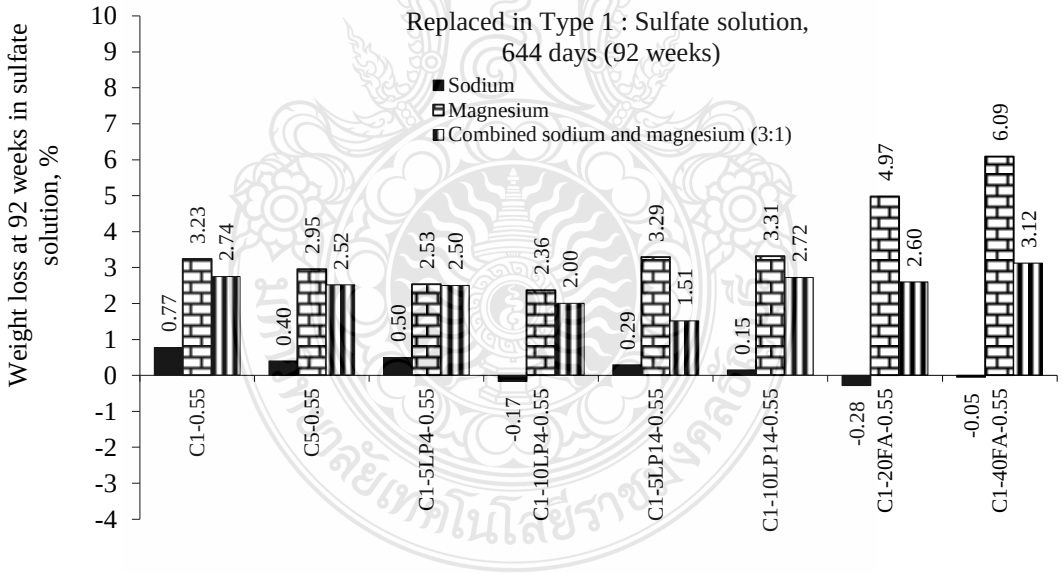
ในการประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยวัดการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์นั้น ได้พิจารณาถึงผลกระทบของชนิดของสารละลายซัลเฟตทั้ง 3 กรณีสารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เช่นเดียวกับการขยายตัวของชิ้นตัวอย่าง โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) เมื่อวัสดุประสานแทนที่ฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

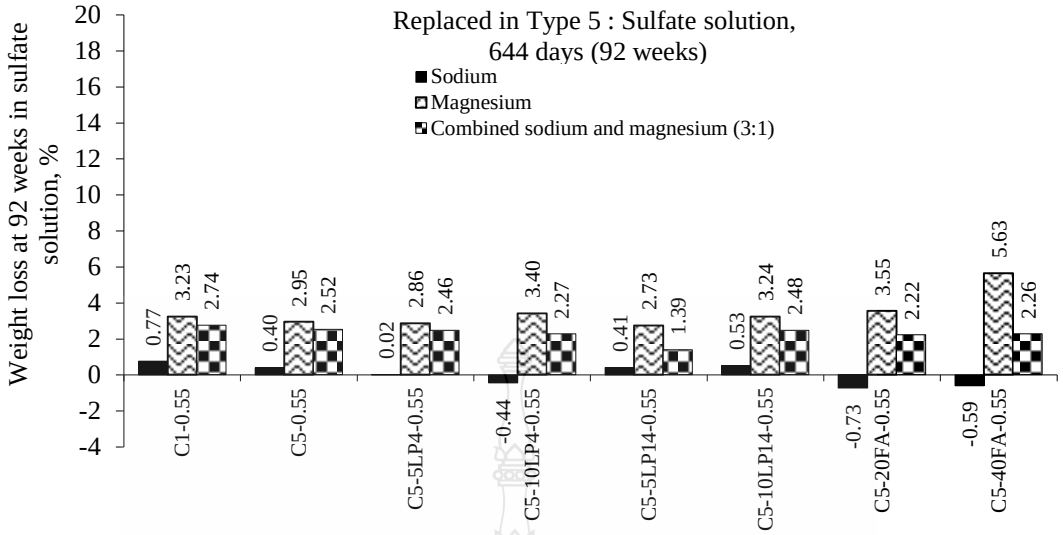
ภาพที่ 4.93 และ 4.94 แสดงการเปรียบเทียบการการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน และเถ้าลอย เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายซัลเฟต 644 วัน ซึ่งจากพิจารณาผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ พบว่า การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น จะมีแนวโน้มให้ค่ามากที่สุด ถัดมาเป็นกรณีในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ส่วนชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น ค่อยข้างน้อยมากหรือบางสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์กลับมีน้ำหนักเพิ่ม ทั้งนี้เป็นเพราะการถูกทำลายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียม

ซัลเฟตจะมีลักษณะที่เสื่อมสภาพของผิวชิ้นตัวอย่าง เนื่องจากกลไกการทำลายจะไปลดความยึดประสานของโครงสร้างของเพสต์ ไม่เหมือนกับกรณีของโซเดียมซัลเฟตซึ่งจะทำให้เกิด Ettringite ในโครงสร้างของเพสต์ผลทำให้เกิดการขยายตัวในชิ้นตัวอย่าง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วนในกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต ในอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนักนั้น จะเห็นได้ว่าชิ้นตัวอย่างที่ถูกทำลายนั้นจะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักอยู่ระหว่างของโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต แต่แนวโน้มการทำลายนั้นจะไปในลักษณะของกลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตมากกว่า กล่าวคือในสารละลายที่ผสมกันดังกล่าว แมกนีเซียมมีแนวโน้มว่าจะมีศักยภาพการทำลายมากกว่า

ถ้าพิจารณาจากภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ ที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์) จากการแช่ในสารละลายซัลเฟต (ภาพที่ 4.95) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบลักษณะของการทำลายของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต และโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ลักษณะการถูกทำลายของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์จะไปในทิศทางเดียวกับการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ (ภาพที่ 4.93 และ 4.94) ทั้งนี้ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว



ภาพที่ 4.93 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายซัลเฟต 644 วัน

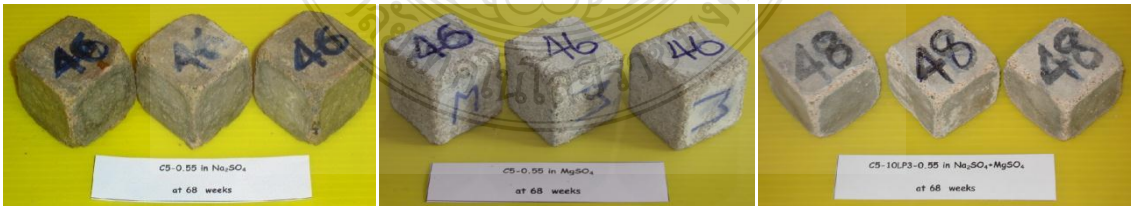


ภาพที่ 4.94 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายซัลเฟต 644 วัน

C1

Na_2SO_4 $MgSO_4$ Na_2SO_4: $MgSO_4$ (3:1)

C5



Na_2SO_4 $MgSO_4$ Na_2SO_4: $MgSO_4$ (3:1)

C1-5LP4

Na_2SO_4 $MgSO_4$ Na_2SO_4: $MgSO_4$ (3:1)

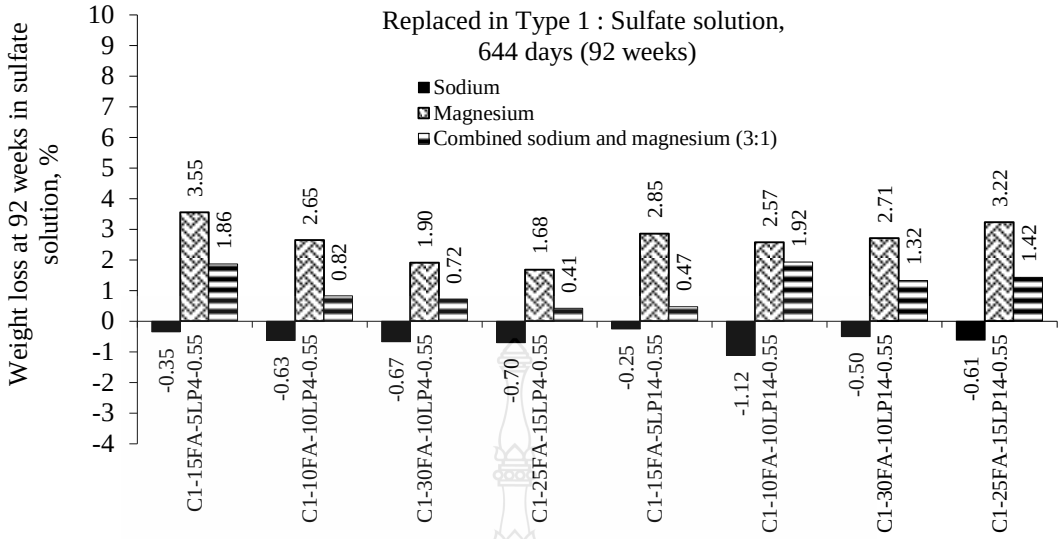
C1-40FA

Na_2SO_4 $MgSO_4$ Na_2SO_4: $MgSO_4$ (3:1)

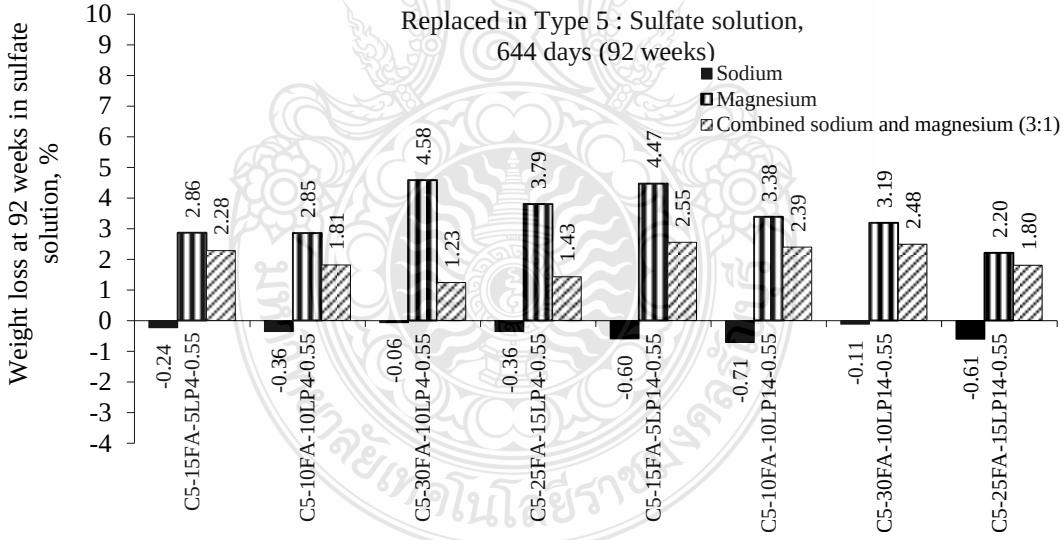
ภาพที่ 4.95 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)

2) เมื่อวัสดุประสานแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

สำหรับภาพที่ 4.96 ถึง 4.97 เป็นการแสดงถึงผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตที่มีต่อการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยทั้งฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย ซึ่งก็ให้ผลในทิศทางเดียวกับของปูนซเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน และเถ้าลอย ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 (ภาพที่ 4.96 ถึง 4.98) กล่าวคือ การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีมากที่สุด ถัดมาเป็นในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) และในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะมีค่าน้อยที่สุด



ภาพที่ 4.96 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายซัลเฟต 644 วัน



ภาพที่ 4.97 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายซัลเฟต 644 วัน

C1-30FA-10LP4

Na_2SO_4 $MgSO_4$ Na_2SO_4: $MgSO_4$ (3:1)

C1-25FA-15LP4

Na_2SO_4 $MgSO_4$ Na_2SO_4: $MgSO_4$ (3:1)

C5-30FA-10LP4

Na_2SO_4 $MgSO_4$ Na_2SO_4: $MgSO_4$ (3:1)

C5-25FA-15LP4

Na_2SO_4 $MgSO_4$ Na_2SO_4: $MgSO_4$ (3:1)

ภาพที่ 4.98 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยทั้งฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 476 วัน (68 สัปดาห์)

4.4 สรุปผลการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน

จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปผลของการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยเป็นวัสดุประสานร่วม 2 ชนิดจะให้ผลดี แต่ในกรณีการต้านทานแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น การใช้ฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยจะให้ผลที่ดี และถ้าพิจารณาถึงการต้านทานซัลเฟตโดยรวมแล้ว โดยพิจารณาถึงการต้านทานซัลเฟตโดยรวมแล้ว โดยพิจารณาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้งในสารละลายซัลเฟตทั้งสามแล้ว แนะนำให้ใช้ฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน

สารละลาย		สารละลายโซเดียมซัลเฟต		สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต		สารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)		การต้านทานซัลเฟตโดยรวม
		การขยายตัว	การสูญเสียน้ำหนัก	การขยายตัว	การสูญเสียน้ำหนัก	การขยายตัว	การสูญเสียน้ำหนัก	
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ล้วน	X	X	X	X	X	X	X
	แทนที่ผงหินปูน	X	O	X	O	X	O	X
	แทนที่เถ้าลอย	✓	✓	✓	X	✓	X	X
	แทนที่ฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอย	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5	ล้วน	O	O	O	O	O	O	O
	แทนที่ผงหินปูน	X	O	X	O	X	O	X
	แทนที่เถ้าลอย	✓	✓	✓	X	✓	X	X
	แทนที่ฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอย	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ 1) X แย่กว่า O เทียบเท่า ✓ ดีกว่า

2) การแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในปริมาณที่เหมาะสมในการเปรียบเทียบนั้นใช้กับสัดส่วนผสมที่ศึกษาในครั้งนี้เท่านั้น

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากผลการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ในสารละลายซัลเฟต (ทั้งโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต และโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต) การขยายตัวของมอร์ต้าร์ (ทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และการขยายตัวของมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร) แทนที่ (ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก) ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีแนวโน้มการขยายตัวน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนแต่มากกว่าหรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ในขณะที่การแทนที่ด้วยเถ้าลอย (ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก) ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน นอกจากนี้เมื่อแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 จะให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังกล่าว มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ยกเว้นการแทนที่ฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอย (ที่ใช้ในครั้งนี้ซึ่งมีปริมาณ CaO เท่ากับร้อยละ 17.40) ที่ปริมาณต่ำๆ (ร้อยละ 10 หรือ 15) จะมีค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีแนวโน้มว่าใกล้เคียงหรือมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.2 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตการสูญเสียน้ำหนักตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และเมื่อแทนที่บางส่วนด้วยฝุ่นหินปูน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตร) หรือเถ้าลอย หรือฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแนวโน้มว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าใกล้เคียงหรือน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ส่วนในกรณีสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างถ้าลอยมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ในขณะที่ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูนหรือฝุ่นหินปูนร่วมกับเถ้าลอยยังให้ค่าใกล้เคียงหรือน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ยกเว้นถ้าแทนที่ปริมาณเถ้าลอยที่สูงขึ้น จะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักที่ใกล้เคียงหรือมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

5.1.3 ผลของความละเอียดของฝุ่นหินปูน (ระหว่างขนาดอนุภาคเฉลี่ยขนาด 4 และ 14 ไมโครเมตร) นั้นให้ผลไม่ค่อยชัดเจนต่อผลกระทบต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟต (ทั้งโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต และโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต) แต่ควรมีการศึกษาถึงผลกระทบของความละเอียดของฝุ่นหินปูนต่อการต้านทานซัลเฟตดังกล่าวเพิ่มเติม

5.1.4 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่ามากที่สุด ถัดมาเป็นในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตตามลำดับ ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่ามากที่สุด ถัดมาเป็นในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) และในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ตามลำดับ

5.1.5 การขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากกว่า (ในที่นี้เท่ากับ 0.55) จะมีค่ามากกว่าเมื่อที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ (ในที่นี้เท่ากับ 0.40)

5.1.6 สัดส่วนที่เหมาะสมของตัวอย่างมอร์ผสมฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยสำหรับการต้านทานซัลเฟต (ในการศึกษาครั้งนี้) ได้แก่ มอร์ต้าร์ที่ใช้สัดส่วนผสมของฝุ่นหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 หรือร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 20 ถึง 30 สามารถต้านทานซัลเฟตโดยรวมได้ดีกว่าสัดส่วนผสมอื่นๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน มีข้อเสนอแนะดังนี้

5.2.1 เพื่อเป็นการลดระยะเวลาในการศึกษาควรพิจารณาเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต แต่ทั้งนี้ต้องศึกษาผลกระทบของความข้มข้นของสารละลายซัลเฟตต่อผลของการศึกษาด้วย

5.2.2 โดยทั่วไปเถ้าลอยนั้นมาจากแหล่งผลิตที่ต่างๆ กัน ย่อมมีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่แตกต่างกัน ดังนั้นน่าจะนำเถ้าลอยจากแหล่งอื่นๆ มาศึกษาคุณสมบัติการต้านทานซัลเฟตเพิ่มเติม

5.2.3 ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ อย่างไรก็ตามเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงควรศึกษาตัวอย่างคอนกรีตต่อไป

5.2.4 ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าความละเอียดของฝุ่นหินปูนให้ผลไม่ชัดเจนต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูนของการศึกษาในครั้งนี้ เพื่อความชัดเจนดังกล่าวจึงน่าจะมีการศึกษาถึงผลกระทบของความละเอียดของฝุ่นหินปูนต่อการต้านทานซัลเฟตเพิ่มเติม

รายการอ้างอิง

[1] ปิติศานต์ กร้ำมาตร และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล, "การต้านทานซัลแฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูน," **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3**, 24-26 ตุลาคม 2550, ชลบุรี, 2550.

[2] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต**, พิมพ์ครั้งที่ 2, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2552.

[3] Vogelis et al, "Portland-limestone cement. Their properties and hydration compared to those of other composite cements," **Cement & Concrete Composites (Electronic) 2005**, Vol. 27, Available: Elsevier/Science Direct (3 may 2009). pp. 191-196.

[4] จตุพร ชูตาภา และ วรพจน์ แสงราม, **แคลเซี่ยมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate: $CaCO_3$)**, วิหารแดง, ปีที่ 1, ฉบับที่ 6 มิถุนายน, 2552.

[5] Kadri et al., "Combined effect of chemical nature and fineness of mineral powders on Portland cement hydration," **RILEM (Electronic) 2009**, Available: RILEM Union/RILEM (3 may 2009). pp. 5-6

[6] LIN Zongshou and ZHAO Qian, "Strength of Limestone-based Non-calcined Cement and its Properties," **Journal of Wuhan University of Technolotgy-Mater**, 2009.

[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] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, **ความคงทนของคอนกรีต**, พิมพ์ครั้งที่ 1, สิงหาคม 2543.

[9] Pitisan Krammart and Somnuk Tangtermsirikul "Expansion, Strength Reduction and Weight Loss of Fly Ash Concrete in Sulfate Solution," **ASEAN Journal on Science & Technology for Delvelopment**, V 21, 2004. pp. 373-390.

[10] สหลาภ หอมวุฒิวงค์, ดิลก คูรัตนเวช และ ชัย จตุรพิทักษ์กุล, "การทดสอบและแปรผลการทดสอบต่อคุณสมบัติต่อเถ้าถ่านหิน," **การสัมมนาทางวิชาการเรื่องการนำเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในงานคอนกรีต**, ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจุลจอมเกล้าธนบุรี.

[11] P. Chindaprasirt, P. Kanchanda, A. Sathonsaowaphak and H.T. Cao "Sulfate resistance of blended cements containing flyash and rice husk ash" ScienceDirect Construction and Building Materials 21 P1356-1361, 2007

[12] Al-Amoudi, O.S.B., "Mechanisms of Sulfate Attack in Plain and Blended Cement," **Proceeding of the International Seminar**, University of Dundee, Scotland, UK, September 1999. pp. 247-260.

[13] P.Pipilikaki, M.Katsioti, J.L.Gallias "Performance of limestone cement mortars in a high sulfates environment" Construction and Building Materials, 2008

[14] KamileTosun, BurakFelekoglu, BülentBaradan, I.AkınAltun "Effects of limestone replacement ratio on the sulfateresistance of Portland limestone cemen tmortars exposed to extraordinary high sulfate concentrations" Construction and Building Materials, 2009

[15] David G.Snelson, John M.Kinuthia "Resistance of mortar containing unprocessed pulverized fuel ash (PFA) to sulfate attack" Construction and Building Materials, 2010

[16] Thidar Aye, Chiaki T. Oguchi "Resistance of plain and blended cement mortars exposed to severe sulfate attacks" Construction and Building Materials, 2010

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 92 สัปดาห์ (644 วัน)

ตารางที่ ก.1 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55

Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)																
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92	100
1	C1-0.40	NS	0.000	0.001	0.001	0.007	0.008	0.016	0.029	0.064	0.074	0.135	0.209	0.260	0.292	0.309	0.351	0.426	-0.788
		MS	0.000	-0.002	0.002	0.004	0.003	0.001	0.007	0.011	0.039	0.075	0.119	0.200	0.254	0.336	0.373	0.416	-1.197
		NS+MS	0.000	0.000	0.002	0.002	0.004	0.008	0.009	0.016	0.048	0.100	0.122	0.234	0.286	0.320	0.374	0.406	-0.555
2	C1-5LP4-0.40	NS	0.000	0.000	0.001	0.005	0.003	0.016	0.025	0.033	0.044	0.058	0.096	0.144	0.202	0.236	0.284	0.328	-0.766
		MS	0.000	-0.001	0.005	0.011	0.013	0.019	0.018	0.024	0.024	0.028	0.046	0.077	0.146	0.207	0.220	0.273	-0.734
		NS+MS	0.000	0.001	0.004	0.007	0.010	0.013	0.015	0.019	0.026	0.059	0.107	0.129	0.176	0.213	0.262	0.308	-0.761
3	C1-10LP4-0.40	NS	0.000	-0.003	-0.001	0.000	0.009	0.020	0.024	0.027	0.033	0.049	0.073	0.109	0.135	0.151	0.182	0.223	-0.851
		MS	0.000	0.000	0.007	0.005	0.007	0.008	0.022	0.030	0.058	0.068	0.083	0.096	0.154	0.182	0.202	0.244	-1.062
		NS+MS	0.000	-0.002	-0.001	0.001	0.002	0.004	0.003	0.007	0.021	0.017	0.025	0.028	0.036	0.042	0.052	0.065	-0.414
4	C1-5LP14-0.40	NS	0.000	0.000	-0.002	0.007	0.011	0.026	0.057	0.066	0.080	0.095	0.136	0.166	0.244	0.275	0.320	0.406	-0.577
		MS	0.000	0.000	0.005	0.004	0.002	0.002	0.012	0.013	0.024	0.053	0.082	0.160	0.193	0.276	0.315	0.375	-0.054
		NS+MS	0.000	0.000	0.001	-0.005	0.004	0.004	0.001	0.013	0.069	0.074	0.129	0.261	0.334	0.399	0.445	0.491	-0.720
5	C1-10LP14-0.40	NS	0.000	0.002	0.000	0.004	0.006	0.013	0.018	0.045	0.069	0.086	0.137	0.161	0.207	0.231	0.289	0.371	-0.773
		MS	0.000	-0.004	-0.002	-0.001	0.000	0.004	0.005	0.011	0.027	0.049	0.064	0.099	0.164	0.192	0.231	0.284	-1.017
		NS+MS	0.000	0.000	0.002	0.004	0.002	0.001	0.014	0.013	0.041	0.058	0.102	0.149	0.173	0.251	0.319	0.366	-1.368
6	C1-20FA-0.40	NS	0.000	0.002	0.002	0.000	0.005	0.008	0.014	0.017	0.025	0.040	0.046	0.048	0.052	0.069	0.086	0.088	-1.126
		MS	0.000	0.003	-0.004	0.001	0.010	0.007	0.009	0.008	0.005	0.006	0.011	0.014	0.011	0.012	0.012	0.020	-0.433
		NS+MS	0.000	0.002	0.004	0.004	0.003	0.006	0.011	0.012	0.012	0.006	0.011	0.009	0.012	0.015	0.021	0.030	-0.774

ตารางที่ ก.1 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 (ต่อ)

Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)																
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92	100
7	C1-40FA-0.40	NS	0.000	0.001	0.004	-0.001	0.007	0.007	0.016	0.017	0.020	0.026	0.039	0.042	0.052	0.055	0.056	0.057	-1.718
		MS	0.000	0.006	0.004	0.001	0.005	0.005	0.001	-0.004	0.004	0.006	0.008	0.006	0.008	0.005	0.007	0.014	-1.168
		NS+MS	0.000	0.005	0.002	-0.003	-0.002	0.005	0.004	0.003	0.002	0.013	0.014	0.019	0.019	0.021	0.021	0.034	-1.529
8	C1-15FA-5LP4-0.40	NS	0.000	0.002	0.009	0.013	0.066	0.115	0.210	0.298	0.419	0.521	0.577	0.643	0.691	0.720	0.744	0.767	-1.169
		MS	0.000	0.000	0.002	0.007	-0.002	0.009	0.002	0.010	0.019	0.032	0.044	0.041	0.048	0.053	0.071	0.073	-0.286
		NS+MS	0.000	-0.003	-0.003	-0.001	-0.007	-0.007	0.001	0.003	0.004	0.018	0.022	0.022	0.024	0.025	0.028	0.043	-0.539
9	C1-10FA-10LP4-0.40	NS	0.000	0.004	-0.001	-0.003	0.009	0.016	0.055	0.122	0.214	0.325	0.414	0.464	0.533	0.559	0.651	0.687	0.214
		MS	0.000	0.001	0.001	0.001	0.004	0.013	0.018	0.007	0.012	0.020	0.034	0.035	0.037	0.091	0.095	0.147	-2.040
		NS+MS	0.000	-0.004	-0.002	0.000	0.004	0.003	0.006	0.015	0.028	0.040	0.047	0.084	0.108	0.112	0.138	0.156	-0.841
10	C1-30FA-10LP4-0.40	NS	0.000	-0.003	-0.002	-0.003	0.002	0.016	0.048	0.074	0.113	0.140	0.179	0.181	0.233	0.240	0.256	0.277	-0.739
		MS	0.000	0.003	0.005	0.002	0.009	0.009	0.012	0.011	0.016	0.020	0.038	0.047	0.055	0.068	0.087	0.097	-0.928
		NS+MS	0.000	0.003	0.005	-0.005	0.009	0.014	0.019	0.028	0.034	0.028	0.041	0.049	0.054	0.062	0.100	0.128	-1.342
11	C1-25FA-15LP4-0.40	NS	0.000	0.004	-0.001	-0.001	0.016	0.028	0.051	0.071	0.133	0.140	0.162	0.169	0.211	0.235	0.302	0.364	-1.060
		MS	0.000	0.006	0.003	0.001	0.005	0.005	0.002	0.006	0.007	0.011	0.023	0.019	0.047	0.076	0.082	0.090	-1.389
		NS+MS	0.000	-0.003	0.000	0.004	0.012	0.015	0.020	0.035	0.048	0.053	0.098	0.115	0.120	0.136	0.142	0.169	0.133
12	C1-15FA-5LP14-0.40	NS	0.000	-0.004	-0.001	-0.003	0.001	0.003	0.023	0.035	0.050	0.101	0.167	0.196	0.236	0.239	0.300	0.315	-0.727
		MS	0.000	0.000	0.001	0.000	0.005	0.010	0.016	0.018	0.023	0.034	0.041	0.047	0.059	0.063	0.084	0.098	-0.994
		NS+MS	0.000	0.000	0.005	0.008	0.017	0.002	0.018	0.025	0.035	0.043	0.053	0.078	0.101	0.151	0.171	0.190	-1.334

ตารางที่ ก.1 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 (ต่อ)

Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)																
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92	100
13	C1-10FA-10LP14-0.40	NS	0.000	0.004	0.003	0.014	0.022	0.042	0.076	0.120	0.141	0.159	0.165	0.184	0.207	0.212	0.275	0.309	-0.925
		MS	0.000	0.005	0.000	0.005	0.004	0.008	0.009	0.019	0.021	0.040	0.085	0.128	0.155	0.181	0.250	0.300	-0.789
		NS+MS	0.000	0.000	-0.004	0.003	0.005	0.012	0.026	0.046	0.078	0.102	0.138	0.215	0.244	0.262	0.313	0.344	-1.210
14	C1-30FA-10LP14-0.40	NS	0.000	0.001	0.006	-0.001	0.005	0.013	0.015	0.026	0.040	0.053	0.060	0.062	0.080	0.094	0.104	0.149	-0.536
		MS	0.000	0.003	0.007	0.001	0.002	0.008	0.013	0.001	0.006	0.008	0.009	0.009	0.015	0.046	0.056	0.067	-1.200
		NS+MS	0.000	0.003	0.001	-0.004	-0.007	0.000	-0.005	0.002	0.018	0.024	0.029	0.040	0.041	0.035	0.040	0.041	-1.937
15	C1-25FA-15LP14-0.40	NS	0.000	0.003	-0.001	-0.007	0.002	0.012	0.038	0.059	0.092	0.109	0.112	0.122	0.142	0.149	0.181	0.202	-0.842
		MS	0.000	-0.002	-0.006	-0.007	-0.009	0.000	0.011	0.004	0.014	0.026	0.036	0.044	0.084	0.134	0.138	0.155	-0.276
		NS+MS	0.000	-0.001	-0.002	-0.001	-0.003	0.003	0.009	0.015	0.020	0.049	0.058	0.066	0.082	0.100	0.129	0.132	-1.347
16	C5-0.40	NS	0.000	0.001	0.004	0.006	0.009	0.011	0.011	0.013	0.029	0.035	0.054	0.067	0.088	0.114	0.117	0.177	-0.852
		MS	0.000	0.004	0.005	0.005	0.007	0.005	0.010	0.019	0.021	0.038	0.070	0.095	0.112	0.154	0.172	0.200	-0.276
		NS+MS	0.000	-0.001	0.000	0.004	0.007	0.007	0.011	0.019	0.021	0.025	0.051	0.089	0.122	0.159	0.175	0.204	-1.540
17	C5-5LP4-0.40	NS	0.000	-0.004	0.007	0.003	0.002	0.005	0.006	0.009	0.025	0.038	0.073	0.099	0.144	0.168	0.216	0.251	-1.085
		MS	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.003	0.001	0.000	0.005	0.025	0.031	0.067	0.086	0.097	0.100	0.134	0.163	-0.633
		NS+MS	0.000	-0.003	0.001	0.002	0.004	0.007	0.004	0.013	0.024	0.046	0.060	0.122	0.201	0.255	0.295	0.345	-1.563
18	C5-10LP4-0.40	NS	0.000	0.005	0.007	0.010	0.015	0.020	0.016	0.021	0.041	0.038	0.058	0.095	0.107	0.131	0.178	0.217	-0.646
		MS	0.000	0.002	0.008	0.010	0.012	0.016	0.020	0.019	0.023	0.048	0.047	0.049	0.056	0.075	0.093	0.127	-0.497
		NS+MS	0.000	0.002	0.010	0.011	0.013	0.018	0.016	0.017	0.028	0.036	0.075	0.079	0.090	0.124	0.154	0.176	-0.788

ตารางที่ ก.1 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 (ต่อ)

Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)																
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92	100
19	C5-5LP14-0.40	NS	0.000	0.001	0.010	0.008	0.015	0.019	0.032	0.041	0.061	0.097	0.157	0.173	0.230	0.251	0.291	0.332	-0.540
		MS	0.000	-0.001	0.008	0.006	0.011	0.013	0.023	0.040	0.069	0.136	0.242	0.319	0.401	0.478	0.517	0.561	-1.133
		NS+MS	0.000	-0.001	0.003	-0.001	0.007	0.007	0.014	0.018	0.019	0.033	0.082	0.153	0.181	0.229	0.282	0.355	0.342
20	C5-10LP14-0.40	NS	0.000	-0.003	0.006	0.006	0.014	0.018	0.020	0.022	0.043	0.072	0.091	0.120	0.168	0.198	0.251	0.296	-0.957
		MS	0.000	-0.004	0.001	0.002	0.006	0.010	0.016	0.019	0.047	0.109	0.172	0.269	0.356	0.426	0.474	0.499	-0.973
		NS+MS	0.000	0.002	0.008	0.006	0.012	0.013	0.011	0.024	0.020	0.041	0.051	0.103	0.135	0.193	0.255	0.321	-0.607
21	C5-20FA-0.40	NS	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.005	0.009	0.011	0.012	0.022	0.050	0.058	0.075	0.090	0.098	0.120	0.171	-1.231
		MS	0.000	0.000	-0.003	-0.009	-0.006	-0.002	-0.004	-0.001	-0.001	0.008	0.012	0.015	0.023	0.036	0.042	0.049	-1.213
		NS+MS	0.000	0.000	-0.003	-0.004	-0.008	-0.005	-0.001	0.006	0.007	0.015	0.021	0.028	0.032	0.047	0.066	0.072	-1.537
22	C5-40FA-0.40	NS	0.000	-0.001	-0.008	-0.006	-0.003	0.001	0.010	0.016	0.020	0.037	0.039	0.045	0.055	0.083	0.109	0.122	-0.596
		MS	0.000	0.001	-0.003	-0.007	-0.003	-0.003	-0.004	-0.003	0.001	-0.003	-0.003	0.002	0.015	0.024	0.043	0.052	-0.799
		NS+MS	0.000	-0.002	-0.003	0.000	0.006	0.004	0.008	0.004	0.013	0.026	0.033	0.043	0.054	0.059	0.059	0.065	-1.554
23	C5-15FA-5LP4-0.40	NS	0.000	0.000	0.003	0.017	0.022	0.039	0.050	0.067	0.069	0.076	0.093	0.166	0.184	0.205	0.218	0.234	-2.205
		MS	0.000	0.000	0.003	0.000	0.008	0.000	0.004	0.000	0.004	0.007	0.011	0.014	0.029	0.040	0.049	0.073	-1.220
		NS+MS	0.000	0.000	0.000	-0.004	0.020	0.032	0.036	0.039	0.039	0.043	0.047	0.044	0.044	0.048	0.047	0.051	-1.495
24	C5-10FA-10LP4-0.40	NS	0.000	0.005	0.006	0.009	0.010	0.018	0.025	0.032	0.039	0.042	0.048	0.064	0.079	0.098	0.155	0.178	-0.460
		MS	0.000	0.001	0.004	0.008	0.006	0.012	0.008	0.010	0.008	0.013	0.023	0.040	0.034	0.035	0.039	0.095	-1.087
		NS+MS	0.000	0.000	0.009	0.006	0.007	0.011	0.011	0.021	0.011	0.016	0.016	0.009	0.018	0.026	0.018	0.057	-0.058

ตารางที่ ก.1 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 (ต่อ)

Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)																
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92	100
25	C5-30FA-10LP4-0.40	NS	0.000	0.000	0.002	-0.001	0.021	0.027	0.032	0.037	0.045	0.065	0.088	0.090	0.102	0.146	0.155	0.164	-0.629
		MS	0.000	0.000	-0.006	-0.006	-0.005	0.015	0.016	0.018	0.023	0.044	0.049	0.054	0.060	0.113	0.121	0.130	-0.834
		NS+MS	0.000	0.000	-0.002	-0.008	-0.009	0.014	0.018	0.019	0.023	0.032	0.034	0.035	0.037	0.055	0.074	0.086	-0.177
26	C5-25FA-15LP4-0.40	NS	0.000	0.001	-0.002	0.012	0.010	0.036	0.051	0.052	0.030	0.050	0.065	0.076	0.076	0.101	0.132	0.159	-0.271
		MS	0.000	0.000	0.004	0.007	0.001	-0.004	0.004	0.006	0.006	0.011	0.034	0.036	0.058	0.087	0.119	0.176	-0.319
		NS+MS	0.000	0.006	0.004	0.003	0.002	0.008	0.015	0.016	0.009	0.014	0.020	0.028	0.046	0.059	0.085	0.119	-1.620
27	C5-15FA-5LP14-0.40	NS	0.000	0.000	0.001	0.000	0.003	0.001	0.006	0.012	0.016	0.017	0.018	0.020	0.064	0.087	0.096	0.129	-1.028
		MS	0.000	0.000	0.000	-0.002	0.000	0.001	0.000	0.001	0.012	0.014	0.015	0.016	0.025	0.027	0.028	0.033	-1.223
		NS+MS	0.000	0.000	0.002	-0.001	0.004	0.001	-0.003	0.004	0.006	0.004	0.011	0.010	0.011	0.012	0.040	0.059	-1.353
28	C5-10FA-10LP14-0.40	NS	0.000	-0.001	0.000	0.002	0.006	0.000	0.006	0.009	0.010	0.019	0.025	0.030	0.040	0.050	0.057	0.067	-1.298
		MS	0.000	-0.001	0.000	0.002	0.003	0.000	0.002	0.001	0.002	0.008	0.020	0.032	0.047	0.050	0.051	0.057	-0.806
		NS+MS	0.000	0.002	-0.002	-0.002	0.001	-0.013	-0.005	0.006	0.008	0.012	0.014	0.014	0.032	0.042	0.046	0.050	-0.475
29	C5-30FA-10LP14-0.40	NS	0.000	0.000	-0.002	0.007	0.011	0.012	0.014	0.017	0.023	0.020	0.023	0.026	0.030	0.036	0.040	0.060	-0.294
		MS	0.000	0.000	0.001	0.004	0.005	0.005	0.011	0.005	0.009	0.004	0.007	0.012	0.017	0.017	0.026	0.032	-0.535
		NS+MS	0.000	0.000	0.000	0.007	0.006	0.007	0.012	0.011	0.013	0.012	0.011	0.014	0.019	0.024	0.034	0.036	-0.374
30	C5-25FA-15LP14-0.40	NS	0.000	0.000	-0.001	-0.001	0.005	0.008	0.007	0.006	0.006	0.007	0.011	0.022	0.028	0.031	0.051	0.072	-1.349
		MS	0.000	0.000	0.001	0.002	-0.003	0.007	0.006	0.012	0.015	0.020	0.027	0.030	0.035	0.043	0.044	0.061	-1.247
		NS+MS	0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.002	0.002	-0.007	0.006	0.004	0.011	0.014	0.017	0.024	0.060	0.075	0.081	-1.005

ตารางที่ ก.1 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 (ต่อ)

Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)																
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92	100
31	C1-0.55	NS	0.000	0.000	0.013	0.035	0.048	0.141	0.228	0.369	0.641	0.858	1.049	1.276	1.483	1.541	1.649	1.778	-0.039
		MS	0.000	0.000	0.004	0.006	0.011	0.016	0.036	0.086	0.179	0.286	0.432	0.615	0.762	0.897	0.946	1.090	-0.404
		NS+MS	0.000	0.000	0.020	0.029	0.046	0.116	0.182	0.254	0.410	0.568	0.746	1.005	1.171	1.286	1.328	1.367	-0.120
32	C1-5LP4-0.55	NS	0.000	-0.010	-0.008	-0.001	0.001	0.003	0.026	0.127	0.243	0.409	0.498	0.587	0.616	0.772	0.805	0.893	-0.613
		MS	0.000	-0.001	0.001	0.001	0.003	0.005	0.021	0.095	0.173	0.203	0.215	0.364	0.486	0.580	0.627	0.673	-0.466
		NS+MS	0.000	-0.003	-0.002	0.001	0.001	0.004	0.018	0.107	0.100	0.117	0.245	0.416	0.511	0.612	0.632	0.698	-1.079
33	C1-10LP4-0.55	NS	0.000	-0.003	0.002	0.003	0.008	0.014	0.029	0.045	0.167	0.209	0.299	0.460	0.523	0.532	0.580	0.647	-0.683
		MS	0.000	-0.002	0.002	0.004	0.008	0.009	0.015	0.011	0.123	0.141	0.237	0.245	0.256	0.344	0.412	0.440	-0.826
		NS+MS	0.000	-0.003	-0.001	0.000	0.003	0.012	0.014	0.019	0.086	0.107	0.233	0.294	0.379	0.407	0.431	0.480	-0.876
34	C1-5LP14-0.55	NS	0.000	0.000	0.001	0.020	0.028	0.030	0.063	0.114	0.251	0.338	0.469	0.510	0.705	0.738	0.815	0.995	-0.856
		MS	0.000	-0.001	0.004	0.006	0.009	0.012	0.035	0.048	0.096	0.172	0.278	0.334	0.361	0.410	0.437	0.492	-0.419
		NS+MS	0.000	0.004	-0.001	0.005	0.010	0.006	0.010	0.042	0.084	0.164	0.334	0.460	0.556	0.576	0.636	0.643	-0.191
35	C1-10LP14-0.55	NS	0.000	0.005	0.004	0.005	0.006	0.012	0.033	0.067	0.125	0.213	0.281	0.331	0.480	0.488	0.599	0.635	-0.589
		MS	0.000	0.000	0.006	0.007	0.029	0.030	0.044	0.076	0.081	0.144	0.189	0.204	0.235	0.276	0.302	0.337	-0.607
		NS+MS	0.000	0.002	0.004	0.007	0.007	0.009	0.018	0.051	0.057	0.115	0.296	0.322	0.392	0.426	0.475	0.509	-0.536
36	C1-20FA-0.55	NS	0.000	0.000	0.004	-0.006	0.003	0.005	0.012	0.022	0.028	0.054	0.074	0.091	0.115	0.120	0.136	0.222	-0.927
		MS	0.000	0.000	0.008	-0.006	0.005	0.001	0.010	0.002	-0.004	0.019	0.032	0.050	0.077	0.104	0.121	0.127	-0.674
		NS+MS	0.000	0.000	0.004	-0.011	0.000	-0.003	-0.002	0.007	0.000	0.010	0.031	0.038	0.080	0.109	0.127	0.134	-0.566

ตารางที่ ก.1 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 (ต่อ)

Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)																
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92	100
37	C1-40FA-0.55	NS	0.000	0.003	-0.006	-0.002	0.005	0.007	0.002	0.006	0.009	0.006	0.007	0.006	0.013	0.050	0.083	0.106	-0.440
		MS	0.000	-0.002	-0.009	0.006	0.009	0.004	0.008	0.007	0.008	0.010	0.012	0.014	0.019	0.021	0.023	0.027	-0.753
		NS+MS	0.000	-0.002	-0.004	-0.002	-0.003	-0.002	-0.001	0.000	0.002	0.004	0.005	0.007	0.013	0.029	0.079	0.093	-0.215
38	C1-15FA-5LP4-0.55	NS	0.000	-0.004	-0.001	0.005	0.007	0.033	0.114	0.198	0.348	0.430	0.581	0.782	0.906	0.977	1.075	1.134	-0.493
		MS	0.000	0.000	0.001	0.000	-0.004	0.001	0.000	0.048	0.120	0.227	0.334	0.455	0.498	0.516	0.555	0.602	-0.546
		NS+MS	0.000	0.000	0.004	0.004	0.009	0.010	0.008	0.024	0.031	0.060	0.146	0.256	0.356	0.517	0.542	0.662	-0.382
39	C1-10FA-10LP4-0.55	NS	0.000	-0.009	0.000	0.001	-0.001	0.018	0.040	0.119	0.206	0.294	0.360	0.588	0.682	0.710	0.775	0.875	0.041
		MS	0.000	-0.006	-0.007	-0.003	-0.001	-0.002	0.005	0.041	0.125	0.295	0.353	0.503	0.526	0.575	0.597	0.684	-1.261
		NS+MS	0.000	-0.001	-0.005	-0.003	-0.003	0.006	0.012	0.022	0.042	0.062	0.229	0.418	0.444	0.503	0.580	0.746	-0.551
40	C1-30FA-10LP4-0.55	NS	0.000	-0.006	-0.013	0.002	-0.012	0.002	-0.001	0.005	-0.002	0.010	0.044	0.045	0.060	0.071	0.080	0.105	-0.954
		MS	0.000	0.010	-0.019	0.013	-0.009	0.008	0.004	0.000	-0.002	0.008	0.020	0.027	0.033	0.050	0.049	0.072	-1.175
		NS+MS	0.000	0.011	-0.017	0.016	-0.027	0.010	-0.002	0.004	-0.003	0.002	0.030	0.040	0.038	0.051	0.078	0.093	-0.161
41	C1-25FA-15LP4-0.55	NS	0.000	-0.004	-0.007	0.008	0.011	0.014	0.023	0.032	0.039	0.051	0.102	0.127	0.146	0.165	0.200	0.283	-1.596
		MS	0.000	-0.001	-0.004	0.001	0.004	0.002	0.004	0.006	0.004	0.035	0.073	0.098	0.133	0.141	0.153	0.159	0.136
		NS+MS	0.000	-0.004	-0.004	0.000	0.004	0.003	0.003	0.006	0.007	0.014	0.028	0.078	0.106	0.122	0.162	0.181	0.129
42	C1-15FA-5LP14-0.55	NS	0.000	-0.001	-0.001	0.003	-0.002	-0.004	0.011	0.025	0.058	0.086	0.149	0.194	0.222	0.252	0.286	0.333	-0.805
		MS	0.000	0.002	-0.001	-0.001	0.000	-0.004	0.007	0.010	0.009	0.039	0.079	0.106	0.113	0.134	0.144	0.151	-0.914
		NS+MS	0.000	0.006	0.005	0.000	-0.001	0.002	0.010	0.014	0.017	0.018	0.022	0.040	0.046	0.081	0.100	0.119	-0.837

ตารางที่ ก.1 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 (ต่อ)

Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)																
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92	100
43	C1-10FA-10LP14-0.55	NS	0.000	0.001	-0.006	0.004	0.004	0.018	0.057	0.113	0.159	0.275	0.388	0.438	0.457	0.570	0.668	0.740	-0.395
		MS	0.000	-0.006	-0.005	0.006	0.009	0.007	0.000	0.010	0.014	0.048	0.072	0.133	0.204	0.248	0.318	0.344	0.089
		NS+MS	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	-0.004	0.007	0.005	0.011	0.014	0.039	0.051	0.083	0.094	0.109	0.116	-0.853
44	C1-30FA-10LP14-0.55	NS	0.000	-0.001	0.003	0.001	0.002	0.006	0.002	0.006	0.004	0.011	0.011	0.013	0.020	0.025	0.034	0.072	-1.406
		MS	0.000	0.001	0.005	0.005	0.001	0.005	-0.005	-0.006	-0.002	0.009	0.007	0.009	0.012	0.013	0.009	0.012	-0.698
		NS+MS	0.000	0.000	0.002	-0.005	0.001	0.009	-0.011	-0.003	-0.004	0.004	0.000	-0.002	0.005	0.004	0.005	0.011	-0.505
45	C1-25FA-15LP14-0.55	NS	0.000	-0.002	-0.001	-0.004	0.002	0.014	0.016	0.022	0.055	0.078	0.095	0.103	0.111	0.121	0.124	0.167	-0.638
		MS	0.000	0.001	-0.002	-0.001	0.005	0.003	0.007	0.006	0.013	0.014	0.059	0.087	0.104	0.201	0.218	0.279	-0.997
		NS+MS	0.000	0.004	0.001	0.004	0.008	0.007	0.008	0.012	0.013	0.016	0.014	0.020	0.027	0.045	0.046	0.058	-0.410
46	C5-0.55	NS	0.000	0.004	0.005	0.004	0.005	0.009	0.020	0.037	0.097	0.109	0.224	0.322	0.336	0.403	0.437	0.505	-0.881
		MS	0.000	-0.005	-0.006	0.006	0.006	0.006	0.013	0.030	0.037	0.100	0.230	0.280	0.300	0.310	0.347	0.370	-1.021
		NS+MS	0.000	0.001	0.006	0.006	0.014	0.018	0.022	0.035	0.085	0.095	0.191	0.300	0.320	0.350	0.365	0.417	-0.865
47	C5-5LP4-0.55	NS	0.000	0.003	0.004	0.005	0.005	0.009	0.011	0.028	0.057	0.077	0.110	0.131	0.178	0.209	0.262	0.337	-0.761
		MS	0.000	0.001	0.003	0.004	0.006	0.008	0.010	0.014	0.122	0.165	0.281	0.557	0.647	0.703	0.744	0.782	-0.613
		NS+MS	0.000	0.001	0.005	0.002	0.006	0.008	0.009	0.013	0.061	0.071	0.111	0.293	0.380	0.424	0.444	0.491	-1.064
48	C5-10LP4-0.55	NS	0.000	-0.004	0.001	0.005	0.003	0.006	0.011	0.016	0.036	0.061	0.107	0.152	0.170	0.222	0.267	0.376	-0.561
		MS	0.000	-0.001	0.001	0.004	0.005	0.002	0.006	0.012	0.019	0.101	0.214	0.442	0.529	0.647	0.668	0.725	-0.500
		NS+MS	0.000	-0.009	0.014	0.020	0.009	0.011	0.008	0.028	0.084	0.097	0.161	0.330	0.418	0.438	0.486	0.562	-0.656

ตารางที่ ก.1 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 (ต่อ)

Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)																
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92	100
49	C5-5LP14-0.55	NS	0.000	0.002	0.006	-0.001	0.006	-0.001	0.005	0.016	0.020	0.032	0.058	0.074	0.093	0.107	0.119	0.198	-0.550
		MS	0.000	0.010	0.010	0.008	0.008	0.000	0.017	0.028	0.048	0.121	0.227	0.286	0.338	0.421	0.447	0.467	-0.958
		NS+MS	0.000	0.007	0.009	0.006	0.003	0.001	-0.001	0.015	0.019	0.034	0.106	0.174	0.230	0.264	0.303	0.322	-0.293
50	C5-10LP14-0.55	NS	0.000	0.005	0.014	0.007	0.011	0.008	0.014	0.019	0.024	0.044	0.060	0.074	0.100	0.129	0.161	0.200	-0.836
		MS	0.000	0.010	0.022	0.016	0.020	0.018	0.012	0.034	0.035	0.078	0.091	0.107	0.130	0.144	0.195	0.227	-0.849
		NS+MS	0.000	0.000	0.011	0.010	0.009	0.008	0.016	0.020	0.023	0.061	0.068	0.114	0.192	0.199	0.200	0.264	-0.056
51	C5-20FA-0.55	NS	0.000	0.000	0.002	0.009	0.006	0.008	0.015	0.025	0.035	0.044	0.076	0.107	0.112	0.120	0.180	0.296	-0.467
		MS	0.000	0.000	0.007	0.008	0.004	0.005	0.005	0.008	0.022	0.043	0.054	0.059	0.073	0.165	0.186	0.271	-0.354
		NS+MS	0.000	0.000	0.010	0.007	0.006	0.008	0.007	0.012	0.013	0.021	0.023	0.036	0.045	0.060	0.077	0.104	-0.768
52	C5-40FA-0.55	NS	0.000	0.000	-0.011	0.002	0.007	0.005	0.016	0.017	0.022	0.035	0.061	0.083	0.094	0.100	0.155	0.190	-0.100
		MS	0.000	0.000	-0.002	0.004	-0.004	-0.002	0.007	0.010	0.027	0.046	0.059	0.110	0.172	0.220	0.236	0.271	0.127
		NS+MS	0.000	0.000	-0.005	0.000	-0.003	0.004	0.005	0.015	0.007	0.013	0.018	0.028	0.032	0.034	0.036	0.048	-0.214
53	C5-15FA-5LP4-0.55	NS	0.000	0.000	0.011	0.012	0.015	0.018	0.022	0.041	0.050	0.098	0.089	0.090	0.094	0.106	0.114	0.158	-0.869
		MS	0.000	0.001	0.002	-0.002	0.008	0.009	0.016	0.024	0.090	0.101	0.160	0.227	0.306	0.378	0.421	0.424	-0.804
		NS+MS	0.000	0.000	-0.002	-0.003	0.005	0.009	0.025	0.049	0.062	0.065	0.043	0.060	0.065	0.082	0.101	0.116	-0.883
54	C5-10FA-10LP4-0.55	NS	0.000	-0.008	-0.005	0.020	0.000	0.022	0.053	0.091	0.132	0.138	0.164	0.187	0.195	0.215	0.241	0.360	0.048
		MS	0.000	0.004	0.000	-0.001	0.004	0.012	0.019	0.042	0.136	0.178	0.239	0.313	0.404	0.486	0.516	0.540	-0.404
		NS+MS	0.000	0.002	-0.003	-0.004	0.000	0.001	0.003	0.009	0.026	0.033	0.062	0.101	0.129	0.185	0.205	0.235	-1.317

ตารางที่ ก.1 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 v (ต่อ)

Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)																
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92	100
55	C5-30FA-10LP4-0.55	NS	0.000	-0.006	-0.006	0.007	0.002	0.009	0.018	0.020	0.029	0.040	0.077	0.082	0.091	0.102	0.116	0.161	-0.717
		MS	0.000	-0.002	-0.005	-0.006	-0.004	0.000	-0.002	0.016	0.055	0.096	0.117	0.134	0.128	0.226	0.251	0.278	-0.635
		NS+MS	0.000	0.001	-0.006	-0.004	0.000	0.004	0.006	0.004	0.013	0.028	0.051	0.078	0.106	0.158	0.196	0.223	-0.820
56	C5-25FA-15LP4-0.55	NS	0.000	0.000	0.001	-0.004	0.001	0.002	-0.004	0.000	0.004	0.021	0.025	0.027	0.021	0.027	0.034	0.044	-1.414
		MS	0.000	-0.001	0.000	-0.006	0.001	-0.002	-0.003	0.011	0.017	0.046	0.017	0.060	0.069	0.078	0.154	0.191	-0.389
		NS+MS	0.000	0.000	-0.007	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.010	0.009	0.019	0.019	0.018	0.029	0.047	0.049	-0.814
57	C5-15FA-5LP14-0.55	NS	0.000	-0.002	-0.002	0.000	0.004	-0.002	0.006	0.048	0.093	0.119	0.128	0.141	0.151	0.166	0.187	0.241	0.524
		MS	0.000	-0.007	-0.008	0.008	0.001	0.000	0.005	0.000	0.011	0.034	0.062	0.146	0.172	0.225	0.232	0.279	-0.911
		NS+MS	0.000	0.003	0.020	0.014	0.017	0.014	0.018	0.030	0.040	0.055	0.056	0.055	0.069	0.096	0.102	0.106	-1.013
58	C5-10FA-10LP14-0.55	NS	0.000	-0.002	0.004	0.000	0.009	0.011	0.023	0.053	0.107	0.206	0.222	0.247	0.266	0.313	0.364	0.433	-0.600
		MS	0.000	-0.002	0.002	-0.002	0.003	0.004	0.007	0.012	0.087	0.138	0.179	0.195	0.270	0.396	0.427	0.469	-0.795
		NS+MS	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.001	0.000	0.002	0.002	0.027	0.045	0.074	0.103	0.121	0.130	0.137	0.145	-0.257
59	C5-30FA-10LP14-0.55	NS	0.000	-0.001	0.004	0.000	0.005	0.003	0.012	0.010	0.011	0.021	0.019	0.021	0.019	0.039	0.036	0.049	-1.479
		MS	0.000	-0.004	-0.003	0.002	0.006	0.002	0.000	0.001	0.008	0.016	0.016	0.018	0.019	0.014	0.025	0.050	-1.149
		NS+MS	0.000	-0.001	0.001	-0.002	0.002	-0.001	0.001	0.001	0.006	0.011	0.014	0.019	0.022	0.019	0.027	0.021	-1.092
60	C5-25FA-15LP14-0.55	NS	0	-0.008	-0.011	-0.004	-0.004	0.000	0.014	0.015	0.020	0.021	0.023	0.020	0.032	0.033	0.043	0.064	-1.385
		MS	0	-0.001	-0.002	-0.009	0.000	0.002	0.005	-0.003	-0.002	0.004	0.007	0.011	0.028	0.041	0.062	0.076	-0.971
		NS+MS	0	-0.001	-0.002	0.002	0.002	0.001	0.004	0.006	0.018	0.019	0.018	0.027	0.036	0.040	0.047	0.048	0.030

ภาคผนวก ข

ตารางค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 92 สัปดาห์ (644 วัน)

ตารางที่ ข.1 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 92 สัปดาห์ (644 วัน)

Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)															
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92
1	C1-0.40	NS	0.00	-0.05	-0.07	-0.16	-0.32	-0.29	-0.35	0.34	-0.99	-0.42	-1.64	-0.82	-1.19	-1.00	-1.04	-0.53
		MS	0.00	-0.08	-0.05	-0.17	-0.03	-0.51	-0.57	0.20	-0.83	0.16	0.03	1.07	3.61	2.24	3.16	3.98
		NS+MS	0.00	-0.16	-0.17	-0.24	-0.48	-0.55	-0.67	-0.11	-1.00	-0.57	-0.74	1.91	3.62	4.05	4.19	4.35
2	C1-5LP4-0.40	NS	0.00	0.07	-0.03	0.15	-0.10	-0.13	-0.49	-0.15	-0.72	-0.36	-1.81	-0.96	-1.53	-1.30	-1.21	-0.59
		MS	0.00	0.11	0.04	0.14	-0.20	-0.31	-0.61	0.98	-0.83	0.23	-0.33	0.08	3.51	3.41	4.59	5.80
		NS+MS	0.00	0.00	-0.10	-0.01	-0.22	-0.02	-0.61	0.20	-0.26	0.38	-0.03	1.92	3.01	2.50	3.06	3.28
3	C1-10LP4-0.40	NS	0.00	0.07	-0.01	0.07	-0.08	-0.11	-0.41	-0.11	-0.80	-0.44	-1.81	-1.07	-1.48	-1.39	-1.28	-0.95
		MS	0.00	-0.03	-0.08	-0.22	-0.19	-0.36	-0.61	1.02	-0.77	-0.19	-0.78	-0.64	3.47	3.25	3.67	4.49
		NS+MS	0.00	0.02	-0.10	-0.03	-0.23	-0.61	-0.65	-0.22	-0.57	-0.04	-0.32	1.35	3.02	1.99	2.59	2.76
4	C1-5LP14-0.40	NS	0.00	-0.12	-0.07	-0.20	-0.43	-0.49	-0.53	-0.23	-0.53	-1.17	-1.56	-1.18	-1.72	-1.53	-1.57	-1.17
		MS	0.00	-0.27	-0.20	-0.27	-0.57	-0.72	-0.48	1.02	-0.61	-1.31	-0.94	-0.89	4.26	4.37	4.62	5.57
		NS+MS	0.00	-0.24	-0.18	-0.26	-0.47	-0.57	-0.58	-0.33	-0.67	-0.77	-1.14	0.49	1.64	1.81	1.68	1.79
5	C1-10LP14-0.40	NS	0.00	-0.12	-0.11	-0.19	-0.39	-0.43	0.06	-0.06	-0.41	-1.04	-1.33	-0.75	-1.20	-0.97	-0.94	-0.68
		MS	0.00	-0.27	-0.17	-0.30	-0.56	-0.73	-0.43	0.44	-0.90	-2.11	-1.50	-1.55	3.67	3.03	3.47	4.58
		NS+MS	0.00	-0.20	-0.12	-0.21	-0.38	-0.47	-0.42	-0.26	-0.51	-0.61	-0.92	0.93	2.49	2.56	2.71	4.79
6	C1-20FA-0.40	NS	0.00	-5.27	0.02	-0.11	-0.11	-0.18	0.01	0.04	-0.09	-0.52	-0.85	-0.62	-1.16	-0.98	-0.89	-0.64
		MS	0.00	-0.18	-0.25	-0.38	-0.54	-0.57	-0.44	1.20	-0.28	-0.52	0.70	1.20	7.69	7.68	7.89	8.86
		NS+MS	0.00	0.04	0.03	-0.01	-0.07	-0.18	0.04	-0.05	-0.25	-0.14	-0.47	0.42	2.39	2.49	2.53	2.69

ตารางที่ ข.1 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 92 สัปดาห์ (644 วัน) (ต่อ)

Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)															
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92
7	C1-40FA-0.40	NS	0.00	-2.16	0.19	0.07	0.05	-0.04	0.41	0.48	0.20	-1.15	-1.42	-1.20	-1.61	-1.52	-1.39	-0.90
		MS	0.00	-0.11	-0.09	-0.32	-0.29	-0.37	-0.13	1.09	0.18	-3.04	3.66	4.87	11.02	11.12	12.26	13.64
		NS+MS	0.00	0.04	0.08	-0.04	-0.10	-0.19	0.18	0.47	0.44	0.07	-0.21	0.47	3.51	3.55	3.85	4.19
8	C1-15FA-5LP4-0.40	NS	0.00	0.00	-0.17	-0.26	-0.43	-0.61	6.22	-0.54	-1.02	-1.81	-1.80	-1.66	-2.25	-2.00	-1.76	-1.71
		MS	0.00	0.00	-0.02	-0.09	-0.27	-0.50	0.42	0.62	-1.04	-1.52	-1.87	-1.98	-1.48	1.03	1.72	-1.86
		NS+MS	0.00	0.00	-0.06	-0.08	-0.15	-0.35	-0.16	-0.36	-0.87	-1.68	-1.59	-0.94	-0.56	-0.52	-0.49	-0.36
9	C1-10FA-10LP4-0.40	NS	0.00	0.00	-0.20	-0.25	-0.41	-0.60	-0.43	-0.41	-1.08	-2.20	-2.10	-1.94	-2.42	-2.22	-2.22	-2.17
		MS	0.00	0.00	-0.19	-0.25	-0.41	-0.64	-0.04	0.92	-1.13	-1.76	-2.01	-2.43	1.05	1.13	1.13	1.27
		NS+MS	0.00	0.00	-0.10	-0.09	-0.16	-0.34	-0.16	-0.20	-0.87	-1.48	-1.65	-1.21	-0.02	0.04	-0.02	-0.57
10	C1-30FA-10LP4-0.40	NS	0.00	0.02	0.08	-0.08	-0.22	-0.35	-0.40	-0.22	-0.65	-1.40	-1.36	-1.20	-0.96	-0.93	-0.87	-1.20
		MS	0.00	-0.06	0.12	0.01	-0.15	-0.30	-0.26	0.44	-0.68	-1.67	-1.24	-1.36	3.53	3.55	3.83	4.10
		NS+MS	0.00	0.12	0.26	0.18	0.07	-0.02	-0.02	0.02	-0.37	-0.89	-1.17	-0.90	-0.70	-0.60	-0.54	-0.46
11	C1-25FA-15LP4-0.40	NS	0.00	0.02	6.76	-0.07	-0.26	-0.33	0.00	-0.16	-0.65	-1.50	-1.61	-1.29	-1.60	-1.39	-1.31	-1.23
		MS	0.00	0.01	0.17	0.06	-0.08	-0.22	0.25	1.29	-0.61	-1.50	-1.13	-1.32	1.94	2.05	2.63	4.39
		NS+MS	0.00	0.14	0.26	0.21	0.07	-0.01	0.35	0.14	-0.38	-1.08	-1.30	-0.81	0.23	0.24	0.26	0.38
12	C1-15FA-5LP14-0.40	NS	0.00	-0.07	-0.03	-0.22	-0.37	-0.49	-0.10	-0.31	-0.85	-1.85	-1.74	-1.51	-1.84	-1.66	-1.65	-1.53
		MS	0.00	-0.18	-0.11	-0.24	-0.46	-0.64	-0.27	0.54	-1.03	-2.01	-1.30	-1.31	3.95	3.99	4.11	4.23
		NS+MS	0.00	-0.10	0.03	-0.08	-0.23	-0.35	0.02	-0.33	-0.95	-1.50	-1.68	-1.15	1.17	1.19	1.30	1.21

ตารางที่ ข.1 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 92 สัปดาห์ (644 วัน) (ต่อ)

Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)															
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92
13	C1-10FA-10LP14-0.40	NS	0.00	-0.11	-0.07	-0.23	-0.39	-0.55	-0.21	-0.32	-0.98	-2.30	-2.22	-1.93	-2.53	-2.31	-2.27	-1.92
		MS	0.00	-0.27	-0.14	-0.28	-0.47	-0.60	-0.18	0.36	-0.88	-1.90	-1.56	-1.43	4.11	4.12	4.22	4.95
		NS+MS	0.00	-0.10	0.02	-0.07	-0.22	-0.31	0.10	-0.11	-0.90	-1.62	-1.70	-1.11	0.75	0.85	0.96	3.29
14	C1-30FA-10LP14-0.40	NS	0.00	-0.04	0.00	0.12	-0.21	-0.15	0.26	-0.04	-0.55	-1.91	-1.82	-1.44	-2.21	-1.72	-1.70	-1.36
		MS	0.00	-0.06	-0.13	0.05	-0.25	-0.30	-0.12	1.20	-0.63	-0.33	0.33	0.65	7.27	7.04	7.65	9.15
		NS+MS	0.00	0.09	0.02	0.03	-0.11	-0.10	0.03	-0.01	-0.47	-1.05	-1.04	-0.86	1.16	1.32	1.52	1.57
15	C1-25FA-15LP14-0.40	NS	0.00	0.03	-0.10	0.06	-0.24	-0.22	-0.07	-0.25	-0.66	-1.70	-1.70	-1.37	-1.90	-1.71	-1.69	-1.41
		MS	0.00	-0.12	-0.22	-0.01	-0.35	-0.33	0.06	0.86	-0.87	0.89	1.54	2.50	7.96	7.96	9.01	11.11
		NS+MS	0.00	0.09	-0.94	0.07	-0.07	-0.02	0.11	0.35	0.09	-0.67	-0.62	-0.58	0.90	1.17	1.27	1.38
16	C5-0.40	NS	0.00	-0.12	-0.11	-0.15	-0.41	-0.37	-0.43	0.40	-0.79	-0.24	-1.36	-0.13	-0.04	0.03	0.07	0.51
		MS	0.00	-0.19	-0.17	-0.22	-0.60	-0.66	-0.74	0.05	-0.72	0.28	0.45	0.71	3.50	3.37	4.13	5.31
		NS+MS	0.00	-0.11	-0.11	-0.16	-0.33	-0.38	-0.47	0.24	-0.50	0.45	0.39	1.33	3.19	3.23	3.56	3.83
17	C5-5LP4-0.40	NS	0.00	0.11	0.06	0.02	0.04	0.05	0.04	0.67	-0.24	-0.03	-0.66	-0.23	-0.62	-0.59	-0.42	-0.14
		MS	0.00	-0.03	-0.04	-0.09	-0.30	-0.33	-0.34	0.31	-0.30	0.33	-0.03	0.33	2.78	2.90	4.09	4.21
		NS+MS	0.00	0.03	-0.04	-0.10	-0.18	-0.20	-0.28	0.48	-0.04	0.38	-0.13	1.27	3.44	3.51	3.97	4.33
18	C5-10LP4-0.40	NS	0.00	0.11	0.05	0.03	-0.16	0.07	0.00	0.85	-0.71	-0.31	-1.53	-0.84	-1.18	-1.07	-1.05	-0.76
		MS	0.00	0.11	0.11	0.05	-0.18	-0.15	-0.15	0.78	-0.47	0.19	-0.30	-0.44	2.50	2.51	2.64	3.57
		NS+MS	0.00	0.06	0.00	-0.07	0.17	-0.13	-0.20	0.93	-0.19	0.35	-0.12	0.78	1.90	1.91	2.81	2.88

ตารางที่ ข.1 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 92 สัปดาห์ (644 วัน) (ต่อ)

Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)															
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92
19	C5-5LP14-0.40	NS	0.00	-0.31	-0.29	-0.30	-0.55	-0.68	-0.39	-0.25	-0.50	-0.90	-1.22	-0.92	-1.21	-1.20	-1.11	-0.84
		MS	0.00	-0.40	-0.40	-0.53	-0.76	-0.95	-0.63	-0.33	-0.78	0.28	1.37	1.06	4.82	4.82	4.89	5.80
		NS+MS	0.00	-0.33	-0.30	-0.36	-0.50	-0.68	-0.22	-2.94	-0.50	-0.31	0.22	0.70	2.73	2.78	3.79	3.90
20	C5-10LP14-0.40	NS	0.00	0.59	-0.31	-0.55	0.00	-0.25	-0.79	-0.34	-1.27	0.24	-2.44	-1.94	-1.92	-1.83	-1.73	-1.45
		MS	0.00	-0.49	-0.50	-0.69	0.00	-0.83	-0.58	-0.39	-0.11	0.16	0.64	1.23	7.00	7.02	7.26	8.51
		NS+MS	0.00	-0.31	-0.30	-0.38	0.00	-0.58	-0.41	-0.24	-0.31	-0.14	0.05	0.81	4.12	4.14	4.20	4.56
21	C5-20FA-0.40	NS	0.00	-0.15	-0.28	-0.15	-0.51	-0.47	-0.60	0.29	-0.14	-1.92	-1.35	-0.88	-1.37	-1.16	-1.20	-0.39
		MS	0.00	-0.24	-0.33	-0.20	-0.53	-10.65	-0.32	1.06	-0.58	-0.03	1.43	4.78	8.77	9.02	9.56	11.56
		NS+MS	0.00	-0.24	-0.32	-0.25	-0.59	-0.63	-0.44	-0.44	-0.85	-1.69	-0.75	1.36	4.52	4.59	4.83	5.09
22	C5-40FA-0.40	NS	0.00	-0.09	-0.17	-0.09	-0.39	-0.41	-0.41	-0.46	-0.81	-2.09	-2.14	-1.69	-1.91	-1.77	-1.42	-1.45
		MS	0.00	-0.11	-0.24	-0.08	-0.37	-0.44	-0.48	1.01	-0.15	1.65	4.69	9.12	12.51	12.73	13.94	16.66
		NS+MS	0.00	-0.05	-0.12	-0.07	-0.32	-0.38	-0.13	0.05	-0.29	-1.05	-0.83	-0.08	1.82	11.43	13.02	13.59
23	C5-15FA-5LP4-0.40	NS	0.00	0.82	-0.18	-0.06	-0.33	-0.47	-0.43	-0.12	-0.61	-2.33	-2.21	-1.82	-2.13	-1.90	-1.82	-1.26
		MS	0.00	-0.47	-0.39	-0.20	-0.49	-0.60	-0.34	1.08	-0.62	-1.55	0.00	1.67	5.25	5.79	6.11	7.15
		NS+MS	0.00	-0.61	-0.47	-0.41	-0.60	-0.70	-0.27	-0.31	-0.81	-0.26	0.33	1.15	3.02	3.06	3.08	3.31
24	C5-10FA-10LP4-0.40	NS	0.00	-0.20	-0.03	0.05	-0.17	-0.31	-0.09	1.72	-0.54	-1.97	-1.92	-1.72	-2.07	-1.84	-1.78	-1.22
		MS	0.00	-0.28	-0.20	0.01	-0.26	-0.37	-0.67	1.14	-0.51	-1.41	0.49	1.70	6.36	6.36	6.40	7.21
		NS+MS	0.00	-0.05	0.04	0.08	-0.13	-0.17	-0.10	0.27	2.09	-0.78	-0.23	0.27	2.18	2.32	2.50	2.81

ตารางที่ ข.1 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 92 สัปดาห์ (644 วัน) (ต่อ)

Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)															
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92
25	C5-30FA-10LP4-0.40	NS	0.00	-0.14	-0.01	0.04	-0.20	-0.22	0.04	-0.06	-0.57	-1.76	-1.58	-1.50	-1.78	-1.75	-1.68	-1.23
		MS	0.00	-0.31	-0.22	-0.05	-0.37	-0.47	-0.22	0.91	-0.71	-1.69	-0.28	0.11	4.42	4.81	4.95	5.66
		NS+MS	0.00	-0.09	0.01	0.03	-0.12	-0.17	-0.39	0.02	-0.40	-1.01	-0.90	-0.57	0.81	0.95	1.17	1.35
26	C5-25FA-15LP4-0.40	NS	0.00	-0.20	-0.07	-0.04	-0.23	-0.26	-3.79	-0.21	-0.67	-1.75	-1.62	-1.54	-1.69	-1.46	-1.24	-1.18
		MS	0.00	-0.15	-0.13	0.01	-0.27	-0.35	-0.19	0.78	-0.76	-1.65	-1.27	-1.22	2.34	2.54	3.54	3.73
		NS+MS	0.00	-0.21	-0.08	-0.09	-0.24	-0.28	-0.37	-0.22	-0.74	-1.37	-1.26	-1.07	1.93	2.00	2.01	2.01
27	C5-15FA-5LP14-0.40	NS	0.00	0.07	-0.14	-0.08	-0.27	-0.34	0.20	-0.06	-0.55	-1.48	-1.34	-1.24	-1.55	-1.49	-1.40	-1.12
		MS	0.00	-0.37	-0.27	-0.09	-0.26	-0.36	0.13	1.23	-0.61	-0.98	-0.82	-0.66	0.81	0.97	2.23	2.61
		NS+MS	0.00	0.01	0.15	0.28	0.17	0.07	0.45	0.25	-0.38	-1.04	-0.72	-0.64	1.09	1.11	1.13	1.39
28	C5-10FA-10LP14-0.40	NS	0.00	-0.40	-0.22	-0.14	-0.38	-0.43	0.32	-0.05	-0.75	-1.94	-1.79	-1.68	-2.31	-2.16	-1.74	-1.59
		MS	0.00	-0.28	-0.18	-0.02	-0.24	-0.33	0.43	1.18	-0.53	-1.30	-0.80	-0.35	3.59	3.61	3.65	3.76
		NS+MS	0.00	-0.17	-0.01	0.12	0.06	-0.05	0.60	0.27	-0.43	-1.08	-1.01	-0.22	0.90	1.07	1.16	1.30
29	C5-30FA-10LP14-0.40	NS	0.00	-0.20	0.00	0.09	-0.20	-0.31	0.19	-0.14	-0.62	2.63	-1.70	-1.41	-1.89	-1.77	-1.57	-1.36
		MS	0.00	-0.26	-0.16	0.00	-0.26	-0.40	0.04	1.34	-0.40	-0.60	-0.04	0.78	5.81	6.00	6.01	6.55
		NS+MS	0.00	-0.10	0.02	0.12	-0.01	-0.19	0.16	0.16	-0.39	-1.13	-0.96	-0.51	1.79	1.80	1.82	1.89
30	C5-25FA-15LP14-0.40	NS	0.00	-0.19	-0.01	0.13	-0.08	-0.20	0.31	-0.01	-0.46	2.03	-1.66	-1.35	-1.60	-1.63	-1.58	-1.23
		MS	0.00	-0.27	-0.17	-0.01	-0.23	-0.36	0.18	1.65	-0.54	-2.45	-1.41	-0.75	1.35	1.49	1.55	2.00
		NS+MS	0.00	-0.20	0.04	0.16	0.04	-0.11	0.27	-0.02	-0.52	-1.15	-1.22	-0.51	0.20	0.28	0.69	2.38

ตารางที่ ข.1 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 92 สัปดาห์ (644 วัน) (ต่อ)

Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)															
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92
31	C1-0.55	NS	0.00	-0.02	0.00	-0.04	0.17	-0.26	-0.20	0.88	-0.62	-0.29	-1.53	-1.01	-1.35	-1.32	-1.22	-0.89
		MS	0.00	-0.06	-0.01	-0.05	-0.34	-0.53	-0.52	0.52	-0.89	-0.35	-1.02	-0.51	2.09	2.09	2.12	2.45
		NS+MS	0.00	-0.32	-0.27	-0.31	-0.51	-0.61	-0.61	0.55	-0.97	-0.73	-1.72	-0.56	0.95	0.96	0.97	0.97
32	C1-5LP4-0.55	NS	0.00	-0.02	0.03	-0.02	-0.12	-0.07	-0.18	1.20	-0.61	-0.20	-1.51	-0.84	-1.09	-0.92	1.16	-0.59
		MS	0.00	-0.07	-0.03	-0.06	-0.36	-0.37	-0.71	1.00	-0.66	0.24	-0.55	-0.58	0.67	0.70	0.75	1.42
		NS+MS	0.00	-0.25	-0.23	-0.25	-0.45	-0.43	-0.57	0.65	-0.65	-0.27	-7.95	0.06	2.04	2.04	2.14	3.84
33	C1-10LP4-0.55	NS	0.00	-0.08	-0.03	-0.12	-0.36	-0.32	-0.47	1.15	-0.71	-0.36	-2.15	-1.60	-1.93	-2.08	-2.01	-1.72
		MS	0.00	-0.04	0.01	-0.02	-0.36	-0.29	-0.52	1.11	-0.71	0.16	-1.03	-1.06	1.05	1.11	1.15	1.24
		NS+MS	0.00	-0.41	-0.38	-0.40	-0.66	-0.68	-0.82	0.58	-1.04	-0.69	-1.76	-0.38	0.81	0.83	0.87	0.88
34	C1-5LP14-0.55	NS	0.00	-0.01	-0.03	-0.12	-0.03	-0.16	0.44	0.38	-0.11	-0.50	-0.93	-0.84	-1.12	-0.90	-0.70	-0.82
		MS	0.00	-0.09	-0.12	-0.24	-0.47	-0.40	-0.23	1.41	-0.29	-1.52	-1.45	-1.23	2.16	2.20	2.24	2.95
		NS+MS	0.00	-0.04	-0.03	-0.05	-0.17	7.98	-0.48	0.24	-0.25	-0.70	-1.10	-0.42	0.27	0.25	0.33	0.38
35	C1-10LP14-0.55	NS	0.00	-0.04	-0.08	-0.14	-0.32	-0.21	-0.11	0.40	-0.24	-0.78	-1.29	-1.02	-1.51	-1.48	-1.48	-0.96
		MS	0.00	-0.11	-0.16	-0.26	-0.53	-0.44	-11.30	0.59	-0.47	-1.63	-1.25	-1.11	2.56	2.61	3.09	3.31
		NS+MS	0.00	-0.08	-0.05	-0.07	-0.20	-0.16	0.27	0.24	-0.19	-0.55	-0.77	-0.31	1.49	1.50	1.50	1.63
36	C1-20FA-0.55	NS	0.00	-0.28	-0.26	-0.42	-0.47	-0.53	-0.14	-0.42	-0.65	-1.08	-1.58	-1.42	-1.87	-1.88	-1.85	-1.42
		MS	0.00	-0.35	-0.35	-0.47	0.00	-0.73	-0.63	0.38	-0.89	-0.71	-0.74	-0.27	4.08	3.60	4.82	5.64
		NS+MS	0.00	-0.29	2.75	-0.35	0.07	-0.44	-0.54	-0.45	-0.77	-1.17	-1.56	-1.37	0.36	0.41	0.54	0.81

ตารางที่ ข.1 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 92 สัปดาห์ (644 วัน)ต่อ)

Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)															
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92
37	C1-40FA-0.55	NS	0.00	0.48	0.14	0.04	-0.01	-0.15	0.04	-0.09	-0.23	-0.61	-1.30	-1.21	-1.57	-1.35	-1.38	-1.17
		MS	0.00	0.33	0.03	-0.14	-0.31	-0.52	-0.99	0.34	-0.77	-0.98	-1.32	-1.26	1.68	1.12	1.62	2.69
		NS+MS	0.00	0.31	0.03	-0.10	-0.14	-0.34	-0.41	-0.49	-0.72	-1.07	-1.48	-1.07	0.12	0.17	0.43	0.62
38	C1-15FA-5LP4-0.55	NS	0.00	0.41	-0.02	-0.18	-0.21	-0.40	-0.69	-0.28	-0.55	-1.04	-1.76	-1.54	-2.03	-1.88	-1.78	-1.45
		MS	0.00	0.31	-0.06	-0.26	-0.43	-0.70	-0.55	1.11	-0.58	-0.70	-1.06	-0.51	2.30	2.29	2.68	3.10
		NS+MS	0.00	0.27	-0.05	-0.21	-0.20	-0.48	-5.74	-0.46	-0.85	-1.26	-1.70	-1.10	0.09	0.11	0.22	0.76
39	C1-10FA-10LP4-0.55	NS	0.00	-0.63	-0.75	-0.69	-0.75	-1.04	-1.11	-0.95	-1.25	-1.86	-2.55	-2.44	-3.05	-2.76	-2.80	-2.42
		MS	0.00	-0.69	-0.82	-0.74	-0.82	-0.64	-0.55	0.19	-1.21	-1.65	-2.17	-1.86	0.74	0.78	0.80	1.53
		NS+MS	0.00	-0.55	-0.58	-0.53	-0.52	-0.65	-0.06	-0.34	-0.87	-1.49	-2.13	-1.89	-1.20	-1.34	-1.23	-1.18
40	C1-30FA-10LP4-0.55	NS	0.00	-0.55	-0.67	-0.59	-0.56	-0.80	-0.92	-0.80	-1.05	-1.40	-2.13	-1.95	-2.34	-2.12	-2.12	-1.82
		MS	0.00	-0.55	-0.66	-0.62	-0.70	-0.96	-2.48	0.31	-1.33	-1.61	-1.97	-1.82	0.29	-0.40	-0.15	0.16
		NS+MS	0.00	-0.50	-0.51	-12.09	-0.50	-0.64	-0.39	-0.53	-0.83	-1.36	-1.77	-1.51	-1.21	-1.59	-1.24	-1.26
41	C1-25FA-15LP4-0.55	NS	0.00	-0.59	-0.62	-0.44	-0.71	-0.98	-0.88	-0.76	-1.00	-1.44	-2.02	-1.87	-2.27	-2.05	-2.11	-1.84
		MS	0.00	-0.60	-0.63	-0.48	-0.69	-1.00	-0.62	0.61	-1.07	-1.30	-1.63	-1.31	0.66	-0.17	0.63	0.57
		NS+MS	0.00	-0.46	-0.41	-0.23	-0.39	-0.69	0.11	-0.46	-0.86	-1.44	-2.07	-1.48	-1.32	-1.33	-1.32	-0.70
42	C1-15FA-5LP14-0.55	NS	0.00	-0.51	-0.54	-0.41	-0.62	-0.82	-0.47	-0.52	-0.72	-1.06	-1.42	-1.25	-1.72	-1.44	-1.48	-1.37
		MS	0.00	-0.47	-0.49	-0.33	-0.57	-0.75	-0.70	0.58	-0.88	-0.95	-1.31	-0.96	0.90	0.03	0.28	2.63
		NS+MS	0.00	-0.39	-0.36	-0.23	-0.32	-0.50	-0.08	-0.30	-0.63	-1.05	-1.54	-1.14	-0.86	-1.16	-1.00	-0.62

ตารางที่ ข.1 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 92 สัปดาห์ (644 วัน) (ต่อ)

Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)															
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92
43	C1-10FA-10LP14-0.55	NS	0.00	-0.68	-0.76	-0.46	-0.78	-1.13	-0.36	-0.48	-1.15	-1.94	-2.93	-2.86	-3.14	-3.13	-3.21	-2.98
		MS	0.00	-0.82	-0.84	-0.62	-0.85	-1.21	-0.77	1.07	-0.80	-1.18	-1.66	-1.27	1.28	1.35	1.40	1.45
		NS+MS	0.00	-0.72	-0.66	-0.41	-0.48	-0.88	-0.78	-0.72	-1.08	-1.80	-2.08	-1.31	0.37	0.39	0.50	0.82
44	C1-30FA-10LP14-0.55	NS	0.00	-0.65	-0.61	-0.28	-0.57	-0.78	-1.90	-0.27	-0.51	-1.22	-2.34	-1.50	-2.06	-1.94	-1.99	-1.64
		MS	0.00	-0.76	-0.76	-0.48	-0.73	-1.15	-0.50	0.11	-1.17	-1.59	-1.93	-1.98	0.13	0.18	0.27	1.15
		NS+MS	0.00	-0.67	-0.65	-0.43	-0.65	-1.00	-0.49	-0.90	0.81	-1.75	-2.26	-1.76	-0.70	-0.68	-0.66	-0.60
45	C1-25FA-15LP14-0.55	NS	0.00	-0.02	-0.25	-0.11	-0.38	-0.86	-0.70	-0.44	-0.71	-1.23	-2.07	-1.68	-2.52	-2.14	-2.21	-1.73
		MS	0.00	0.06	-0.20	0.07	-0.43	-0.93	-1.40	0.62	-0.82	-1.18	-1.67	-1.75	0.08	0.01	0.13	2.12
		NS+MS	0.00	-0.06	2.69	-0.05	-0.34	-0.80	-0.71	-0.58	-0.91	-1.52	-2.11	-1.77	-1.60	-1.50	-1.58	-1.60
46	C5-0.55	NS	0.00	-0.02	-0.09	-0.04	-0.12	-0.20	-0.17	0.48	-0.51	-0.14	-1.65	-0.49	-1.51	-1.17	-1.22	-0.68
		MS	0.00	-0.13	-0.03	-0.05	-0.35	-0.44	-0.42	0.86	-0.57	0.30	1.27	0.15	2.24	2.26	2.19	2.40
		NS+MS	0.00	-0.39	-0.39	-0.38	-0.56	-0.64	-0.65	0.47	-0.87	-1.58	3.09	0.70	2.90	2.89	2.70	2.63
47	C5-5LP4-0.55	NS	0.00	0.00	0.06	-0.04	0.12	-0.12	-0.24	0.48	-0.84	-0.28	-1.62	-1.23	-1.49	-1.42	-1.45	-1.13
		MS	0.00	-0.07	0.01	-0.06	0.00	-0.38	-0.47	1.01	-0.74	-0.02	-0.40	-0.01	1.41	1.44	1.39	1.76
		NS+MS	0.00	-0.29	-0.26	-0.34	0.09	-0.55	-0.63	0.63	-0.47	-0.11	-0.41	0.23	1.87	1.86	1.60	1.83
48	C5-10LP4-0.55	NS	0.00	-0.26	-0.15	-0.26	8.70	-0.28	-0.42	1.42	-1.30	-0.61	-2.54	-2.14	-2.53	-2.35	-2.61	-2.12
		MS	0.00	-0.06	0.04	-0.03	-0.25	-0.27	-0.34	1.39	-0.63	0.16	-0.89	-0.81	1.21	1.20	1.04	2.30
		NS+MS	0.00	-0.34	-0.28	-0.39	-0.54	-0.48	-0.56	0.08	-0.82	-0.18	-0.94	-0.40	0.89	0.68	1.12	1.11

ตารางที่ ข.1 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 92 สัปดาห์ (644 วัน) (ต่อ)

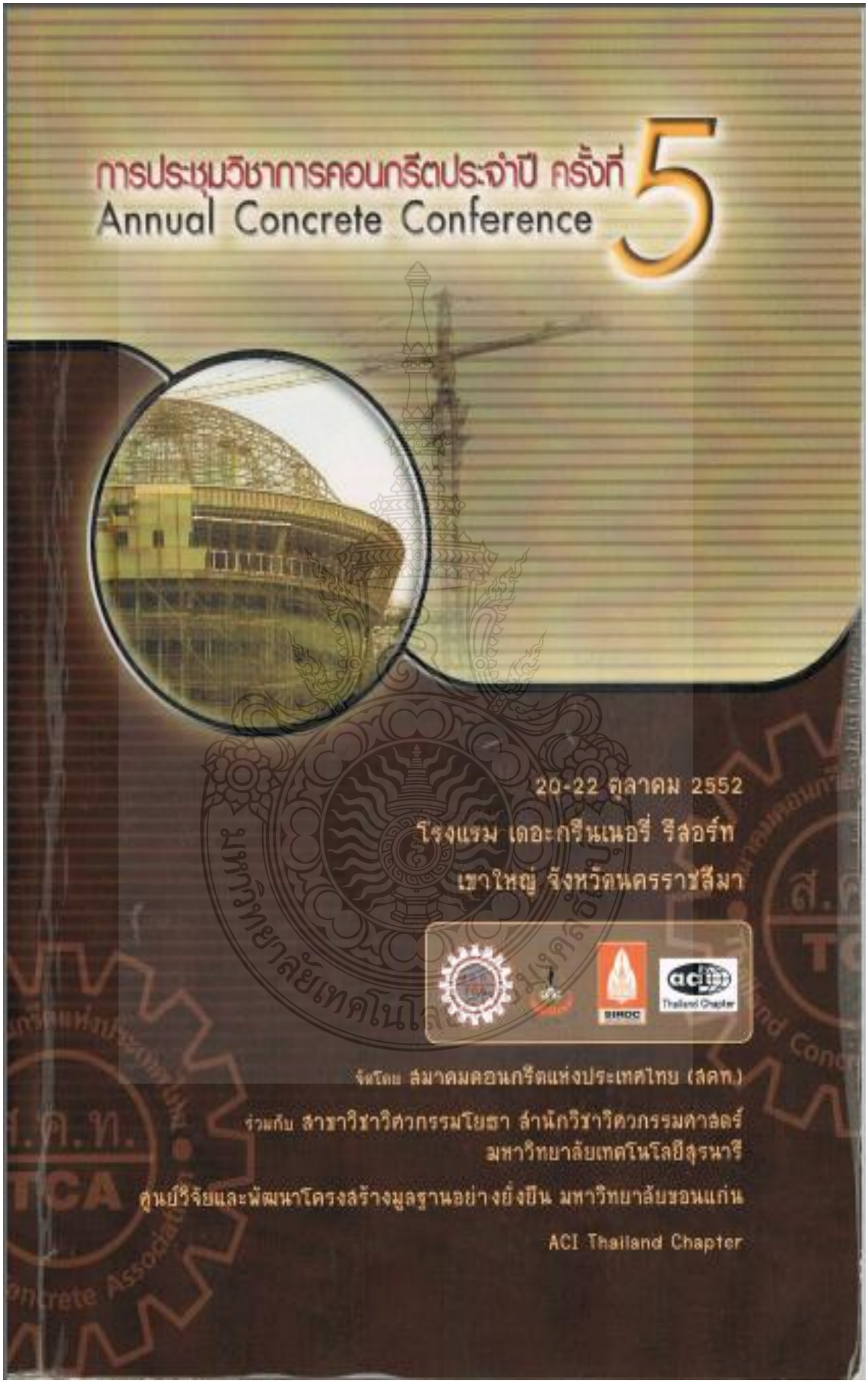
Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)															
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92
49	C5-5LP14-0.55	NS	0.00	-0.04	2.87	-0.07	-0.15	-0.02	0.10	5.35	0.16	-0.23	-0.72	-0.65	-0.97	-0.76	-0.77	-0.64
		MS	0.00	-0.14	-0.11	-0.23	-0.46	-0.36	0.59	1.58	-1.47	-0.22	0.31	0.61	2.42	2.45	2.43	3.71
		NS+MS	0.00	-2.18	0.03	-0.03	-0.12	-0.05	0.01	0.21	-0.17	-0.44	-0.58	-0.13	1.45	1.18	1.20	1.39
50	C5-10LP14-0.55	NS	0.00	-0.08	0.04	-0.12	-0.15	0.02	0.83	6.69	0.36	-0.12	-0.78	-0.51	-0.92	-0.65	-0.69	-0.57
		MS	0.00	-0.13	-0.09	-0.27	-0.46	-0.35	0.41	1.53	-0.27	-0.35	-0.03	-0.01	1.87	1.09	1.74	2.08
		NS+MS	0.00	-0.05	0.03	-0.05	-0.07	0.06	-10.71	0.42	0.02	-0.24	-0.24	0.38	1.14	1.18	1.30	1.34
51	C5-20FA-0.55	NS	0.00	-0.82	-0.75	-0.72	-0.92	-1.00	-0.14	-0.72	-1.54	-3.13	-2.99	-2.56	-2.56	-2.73	-3.13	-2.45
		MS	0.00	-1.71	-1.66	1.84	-1.91	-1.96	-0.89	-0.18	-2.36	-3.46	-3.11	-2.92	-1.29	-1.27	-1.46	-1.38
		NS+MS	0.00	-0.60	-0.50	-0.40	-0.49	-0.58	0.20	-0.19	-1.94	-1.31	-1.14	-0.47	0.35	0.40	0.86	1.08
52	C5-40FA-0.55	NS	0.00	-0.94	-0.92	-0.84	-1.14	-1.37	-0.62	-1.17	-1.86	-3.56	-3.39	-2.99	-3.52	-3.32	-3.31	-2.90
		MS	0.00	0.24	0.27	0.31	0.02	-0.23	0.57	1.37	-0.80	-1.41	-1.14	-0.53	2.71	2.64	2.60	3.33
		NS+MS	0.00	-0.04	0.00	0.09	-0.07	-0.29	0.25	-0.14	-0.79	-1.62	-1.67	-1.11	-1.13	-2.17	-1.15	-1.19
53	C5-15FA-5LP4-0.55	NS	0.00	-0.71	-0.70	-0.67	-0.83	-0.85	0.08	-0.49	-1.31	-2.42	-2.24	-1.98	-2.38	-2.31	-2.50	-2.13
		MS	0.00	-0.83	-0.73	-0.69	-0.91	-0.99	0.02	0.31	-1.40	-2.44	-2.19	-1.93	1.40	0.98	1.51	1.73
		NS+MS	0.00	-0.52	-0.51	-0.44	-0.49	-0.62	0.31	-0.14	-1.00	-1.51	-1.36	-0.56	1.20	1.24	1.19	1.16
54	C5-10FA-10LP4-0.55	NS	0.00	-1.13	-1.11	-1.03	-1.24	-1.18	0.40	-1.10	-1.85	-3.12	-3.04	-2.88	-3.30	-3.25	-3.21	-3.08
		MS	0.00	-1.09	-0.91	-0.84	-1.17	-1.10	0.58	0.90	-1.34	-2.52	-2.30	-2.36	0.27	0.29	0.97	1.71
		NS+MS	0.00	-0.76	-0.66	-0.57	-0.60	-0.61	0.72	0.26	-1.05	-0.58	-1.49	-0.97	0.54	0.33	0.56	0.68

ตารางที่ ข.1 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 92 สัปดาห์ (644 วัน) (ต่อ)

Mix No.	Sample No.	Sulfate Solution	Expansion of Mortar Bars Specimens / Weeks, (%)															
			0	2	3	4	8	13	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92
55	C5-30FA-10LP4-0.55	NS	0.00	0.24	0.29	0.31	-0.01	-0.14	0.97	0.37	-0.43	-1.83	-1.73	-1.32	-2.06	-1.78	-1.82	-1.52
		MS	0.00	0.00	0.03	0.12	-0.28	-0.48	0.53	1.91	-0.90	-1.99	-1.56	-1.00	1.07	1.18	2.53	3.46
		NS+MS	0.00	-0.42	0.15	0.16	-0.11	-0.25	0.62	0.08	-0.69	0.03	-1.45	-1.03	0.05	-0.14	0.10	0.09
56	C5-25FA-15LP4-0.55	NS	0.00	0.19	0.21	0.20	-0.07	-0.16	1.23	0.36	-0.64	-1.99	-2.00	-1.70	-2.69	-2.54	-2.44	-2.09
		MS	0.00	0.02	0.10	0.17	-0.17	-0.25	1.12	2.19	-0.42	-1.67	-1.47	-1.60	0.65	-0.14	1.16	2.65
		NS+MS	0.00	0.57	0.63	0.68	0.44	0.39	1.58	1.05	-0.05	0.03	-0.81	-0.67	0.88	0.95	0.87	0.85
57	C5-15FA-5LP14-0.55	NS	0.00	-0.07	-0.06	-0.07	-0.34	-0.41	0.82	0.01	-0.72	-2.17	-2.00	-1.46	-2.45	-1.95	-1.97	-1.71
		MS	0.00	-0.07	-0.08	-0.11	-0.38	-0.51	0.60	1.10	-0.62	-1.83	-1.26	-0.66	3.58	3.63	3.67	5.02
		NS+MS	0.00	0.27	0.28	0.30	0.15	0.08	1.03	0.62	-0.03	-1.11	-0.88	-0.22	1.69	1.80	1.95	1.98
58	C5-10FA-10LP14-0.55	NS	0.00	0.22	0.26	0.28	0.01	-0.08	1.34	0.48	-0.51	-2.95	-1.93	-1.47	-2.53	-2.28	-2.24	-1.86
		MS	0.00	-0.19	-0.19	-0.09	-0.45	-0.53	0.91	2.00	-0.64	-0.98	-1.69	-1.45	1.00	0.91	1.34	2.25
		NS+MS	0.00	-0.03	-0.02	0.00	-0.20	-0.23	0.96	0.34	1.92	-1.66	-1.57	-0.95	1.07	1.21	1.24	1.27
59	C5-30FA-10LP14-0.55	NS	0.00	0.22	0.13	0.08	-0.02	-0.31	0.70	0.21	-0.45	-1.73	-1.62	-1.16	0.07	-1.62	-1.68	-1.25
		MS	0.00	0.10	0.04	-0.02	-0.22	-0.49	-0.66	0.10	-0.64	-1.61	-1.54	-1.45	1.72	1.80	1.72	2.07
		NS+MS	0.00	0.28	0.11	0.07	-0.04	-0.24	0.51	0.22	-0.44	-1.14	-1.12	-0.73	0.54	0.34	0.48	1.37
60	C5-25FA-15LP14-0.55	NS	0.00	0.05	0.11	-0.07	0.04	-0.26	1.05	0.26	-0.53	-12.27	-1.93	-1.34	-2.54	-1.97	-2.03	-1.75
		MS	0.00	-0.09	-0.07	-0.22	-0.23	-0.51	0.82	1.39	-0.65	-1.54	-1.64	-1.76	0.67	0.56	0.65	1.05
		NS+MS	0.00	-0.01	0.08	-0.57	0.00	-0.23	0.89	1.00	-0.53	-1.41	-1.19	-0.76	0.55	0.53	0.60	0.67

ภาคผนวก ค

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่


การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5
Annual Concrete Conference 5
20-22 ตุลาคม 2552
โรงแรม เดอะกรีนเนอรี่ รีสอร์ท
เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา
จัดโดย สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท.)
ร่วมกับ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ACI Thailand Chapter

08-7

เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ

การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5

Annual Concrete Conference 5 (ACC5)

บทความ

- **STR สาขาโครงสร้างคอนกรีต**
- **MAT สาขาคอนกรีตและวัสดุ**
- **REP สาขาบำรุงรักษา ซ่อมแซม และเสริมกำลังคอนกรีต**
- **ENV สาขาคอนกรีตเพื่อสิ่งแวดล้อมและการอนุรักษ์พลังงาน**
- **ART บทความทางวิชาการ**

20 – 22 ตุลาคม 2552

โรงแรม เดอะกรีนเนอรี่ รีสอร์ท เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา

จัดโดย

- **สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย**

ร่วมกับ

- **สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**
- **ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น**
- **ACI Thailand Chapter**

สงวนลิขสิทธิ์ © 2552 ตาม พรบ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2521 โดย สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2552

คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ "การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5"

ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์	แก้วกุลชัย	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
คุณกรธนา	ดีสว่างเนตร	บริษัท ดับบลิว อาร์ เกรซ (ไทยแลนด์) จำกัด
คุณขจรศักดิ์	มโนทรัพย์ศักดิ์	บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)
ผศ.ดร.คมสัน	มาลีสี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ดร.ฉัตร	สุจินดา	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ศ.ดร.ชัย	จาตุรพิทักษ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ชูชัย	สุจิวรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ชวลิต	มัชฌิมดำรง	บริษัท เอพซิลอน จำกัด
ดร.ณัฐวัฒน์	จุฑารัตน์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผศ.ดร.ทวีชัย	สำราญวานิช	มหาวิทยาลัยบูรพา
รศ.ดร.บุญไชย	สถิตมั่นในธรรม	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
คุณบุญรอด	คุปติทัพหิ	บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด (CPAC)
รศ.ดร.บุรฉัตร	ฉัตรวีระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศ.ดร.ปริญญา	จินดาประเสริฐ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ประเสริฐ	สุวรรณวิทยา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.ปิติ	สุคนธสุขกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ปิติศานต์	กร้ำมาตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ปัณฑ์	ปานถาวร	บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด (CPAC)
ดร.ภุควัฒน์	แสนเจริญ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
คุณมนสิช	สาริกะภูติ	บริษัท สยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด
คุณโยธิน	อึ่งกูล	บริษัท ซุปเปอร์บล็อก จำกัด
น.ท.ผศ.ดร.ธนากร	พีระพันธุ์	โรงเรียนนายเรืออากาศ
ผศ.ดร.ธีรวัฒน์	สินศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ดร.ธรรมนูญ	เฮงษฎีกุล	ศูนย์การศึกษาต่อเนื่อง มจธ.
ดร.รัฐภูมิ	ปริชาติปรีชา	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.รักติพงษ์	สหมิตรมงคล	สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย
ผศ.ดร.วันชัย	ยอดสุดใจ	*มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*
ดร.วิเชียร	ชาลี	มหาวิทยาลัยบูรพา
ศ.ดร.สมนึก	ตั้งเติมสิริกุล	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
ผศ.ดร.สมิตร	ส่งพิริยะกิจ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ "การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5" (ต่อ)

รศ.ดร.สุวิมล	สัจจวาณิชย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สิทธิชัย	แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
คุณสุรชัย	สุทธิธรรมมา	Elkem Materials S.E.A.
คุณสุรพล	พฤกษานุกูล	บริษัท ฟีนิกซ เอส ดี เอส จำกัด
รศ.เอนก	ศิริพานิชกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.อุบลลักษณ์	รัตนศักดิ์	มหาวิทยาลัยบูรพา

บทความวิจัย สาขาคอนกรีตและวัสดุ (ต่อ) **หน้า**

24.	**MAT-30**	ผลของซิลิกาที่สังเคราะห์จากเถ้าแกลบต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์	**MAT-144**
25.	**MAT-31**	ผลกระทบของเอฟจีดียิปซัมในมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน และเถ้าก้นเตาบดละเอียดต่อการต้านทานซัลเฟต	**MAT-150**
26.	**MAT-32**	การศึกษาสมบัติเชิงกลของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด	**MAT-156**
27.	**MAT-33**	คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าผสมเถ้าก้นเตา	**MAT-162**
28.	**MAT-35**	การเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วของคลื่นอุลตราโซนิคของคอนกรีตเสริมเส้นใยภายใต้แรงอัด ตอนที่ 1 รูปแบบการเปลี่ยนแปลง	**MAT-167**
29.	**MAT-36**	การเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วของคลื่นอุลตราโซนิคของคอนกรีตเสริมเส้นใยภายใต้แรงกระทำ ตอนที่ 2 การประมาณระดับความเสียหาย	**MAT-172**
30.	**MAT-40**	การหดตัวแบบแห้ง และการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	**MAT-180**
31.	**MAT-41**	คุณสมบัติของคอนกรีตที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วย เถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงในปริมาณสูง	**MAT-186**
32.	**MAT-42**	การศึกษาเบื้องต้นของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเพอร์ไลท์	**MAT-192**
33.	**MAT-43**	สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ของคอนกรีตโดยการประยุกต์ใช้ชุดทดสอบ ตามมาตรฐาน AASHTO T259	**MAT-199**
34.	**MAT-45**	การชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และซีโอไลต์เป็นวัสดุยึดประสาน	**MAT-206**
35.	**MAT-46**	การศึกษาคอนกรีตมวลเบาเสริมกำลังด้วยเส้นใยเหล็กและใช้วัสดุเบาจากของเสียเทอร์โมเซ็ตติ้งพลาสติก	**MAT-214**
36.	**MAT-47**	วิธีตรวจสอบสารปอซโซลานเชิงคุณภาพอย่างรวดเร็วภายในหนึ่งวัน	**MAT-220**
37.	**MAT-48**	คอนกรีตบล็อกโดยใช้ดินขาวจากจังหวัดอุตรดิตถ์เป็นส่วนผสม	**MAT-226**
38.	**MAT-49**	การศึกษากำลังในการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำกับแท่งวัสดุเสริมแรง เส้นใยสังคราะห์	**MAT-232**
39.	**MAT-50**	ผลกระทบของผงหินปูนต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต	**MAT-241**
40.	**MAT-51**	คุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติไดอิเล็กตริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอย	**MAT-249**
41.	**MAT-52**	การวัดค่าคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC จากค่าความหนาแน่นของคอนกรีต	**MAT-261**
42.	**MAT-53**	ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอย ฝุ่นหินปูนและสารขยายตัว	**MAT-267**

วันที่ 22 ตุลาคม 2552 **ห้อง Falcon 2**

เวลา	ประธานภาค : **ศ.ดร. สมนึก ตั้งเติมสิริกุล**	รองประธานภาค : **ผศ.ดร. ชูชัย สุจิวรกุล**
08.30 - 08.45 น.	คุณสมบัติของสารประกอบของปูนซีเมนต์ที่ผสมหินปูนบดละเอียด	**MAT-02**
08.45 - 09.00 น.	ผลกระทบของการกระจายขนาดของอนุภาคซีเมนต์ต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์	**MAT-27**
09.00 - 09.15 น.	ผลกระทบของผงหินปูนต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต	**MAT-50**
09.15 - 09.30 น.	ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอย ฝุ่นหินปูนและสารขยายตัว	**MAT-53**
09.30 - 09.45 น.	PREDICTION OF TENSILE ADHESION STRENGTH OF TILE ADHESIVE USING STATISTICAL MIXTURE DESIGN	**MAT-56**
09.45 - 10.00 น.	กำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวปนทรายแป้งผสมซีเมนต์บดอัด	**MAT-01**
10.00 - 10.15 น.	ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบและเถ้าปาล์มน้ำมันต่อโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์เพสต์ผสม	**MAT-29**
10.15 - 10.30 น.	***พักทาน น้ำชา-กาแฟ***	
เวลา	ประธานภาค : **ผศ.ดร. ปิติศานต์ กร้ำมาตร**	รองประธานภาค : **ผศ.ดร. เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์**
10.30 - 10.45 น.	REUSE OF CRACKED CONCRETE TEST CUBES IN MASONRY STRUCTURE BY USING CEMENT PASTE STRENGTHENING	**MAT-17**
10.45 - 11.00 น.	ซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมเถ้าสบู่ดำ	**MAT-04**
11.00 - 11.15 น.	คอนกรีตผสมเศษหัวเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงเป็นมวลรวมหยาบ	**MAT-06**
11.15 - 11.30 น.	คอนกรีตบล็อกโดยใช้ดินขาวจากจังหวัดอุตรดิตถ์เป็นส่วนผสม	**MAT-48**
11.30 - 11.45 น.	การศึกษาสมบัติเชิงกลของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด	**MAT-32**
11.45 - 12.00 น.	***พิธีปิดการประชุมวิชาการฯ***	

ผลกระทบของผงหินปูนต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

EFFECT OF LIMESTONE POWDER ON EXPANSION OF MORTAR IN SODIUM SULFATE SOLUTION

สุขชัย สุขยานุดิษฐ์ (Sukachai Sukayanudist)[1]

ปิติศานต์ กร้ำมาตร (Pitisan Krammart)[2]

อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ (Ittiporn Sirisawat)[3]

สมนึก ตั้งเติมสิริกุล (Somnuk Tangtermsirikul)[4]

[1]นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี sukayanudist@gmail.com

[2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี pitisan.k@en.rmutt.ac.th

[3]นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ittiporn@stud.siit.tu.ac.th

[4]ศาสตราจารย์ ดร. ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ somnuk@siit.tu.ac.th

บทคัดย่อ : การศึกษานี้เป็นการประเมินการต้านทานซัลเฟตของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนขนาดเฉลี่ย 3 และ 15 ไมครอน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 0, 5, 10, และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำการแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แล้ววัดการขยายตัวของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ในช่วงอายุ 72 สัปดาห์ ผลการศึกษาพบว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยชนิดและการแทนที่ของวัสดุประสานมีผลต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์น้อยเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ นอกจากนี้พบว่าการแทนที่ผงหินปูนทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ทำให้การขยายตัวของตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับตัวอย่างปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนผลของความละเอียดของผงหินปูน (ระหว่าง 3 ไมครอนและ 15 ไมครอน) มีผลกระทบค่อนข้างน้อยต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต โดยเฉพาะเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ

ABSTRACT : This investigation was aimed to determine the sulfate resistance of mortar specimens made from two types of ordinary Portland Cement (Types I and V), and Types I and V cement replaced limestone powder with average size of 3 and 15 micron. The studied mixes used w/b ratio of 0.40 and 0.55 and their corresponding limestone powder content of 0, 5, 10, and 20 percent by weight of total binder. The samples were immersed in sodium sulfate solution and thereafter their expansions during at 72 weeks were measured. The study revealed that the expansions of the Type V cement mortars exposed in the sodium sulfate solution were less than that made of the Type I cement. Types and replacing contents of binders caused slightly differences in expansion of mortars in low water-binder ratio cases. Also, it was found that the replacement of limestone powder in cement types I and type V caused less expansion than Type I cement and gave equivalent expansion to those made from Type V. The Fineness of limestone powder (between 3 microns and 15 microns) showed insignificant effect on the expansion of mortar, in sodium sulfate solution, especially when the w/b ratio low.

KEYWORDS: Limestone powder, Sulfate resistance, Sodium sulfate, Expansion

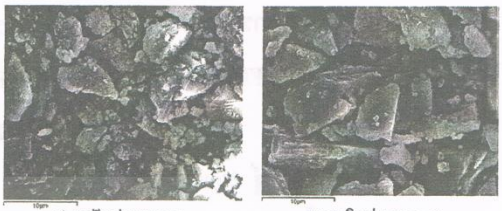
1. บทนำ

ความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเป็นอีกคุณสมบัติหนึ่งที่มีความสำคัญนอกเหนือจากคุณสมบัติทางด้านการต้านกำลังอัด ปัจจุบันพบว่าโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมที่มีสารซัลเฟตซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) สามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ สารซัลเฟตดังกล่าวมักพบได้ในดิน น้ำใต้ดิน น้ำเสียจากอาคารบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรม หรือในน้ำทะเลที่มีซัลเฟตเป็นองค์ประกอบหลัก ตัวอย่างของสารละลายซัลเฟตที่พบมากในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อคอนกรีต เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) เป็นต้น ความเสียหายจากซัลเฟตที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตนั้นจะเกิดการผุกร่อน พองตัว และแตกร้าวอย่างรุนแรง ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟตและความชื้น จากผลการศึกษาของนักวิจัยในอดีต [1-3] พบว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย ในอัตราส่วนที่เหมาะสมสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีโดยเฉพาะสารละลายโซเดียมซัลเฟต อย่างไรก็ตามควรพิจารณาเลือกหาวัสดุอื่นๆ มาร่วมใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของผงหินปูนต่อคุณสมบัติการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในโซเดียมซัลเฟต เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำผงหินปูนมาใช้

2. วิธีการศึกษา

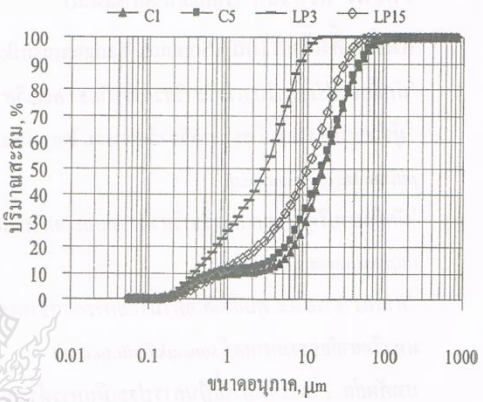
2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ผงหินปูนขนาดเฉลี่ย 3 และ 15 ไมครอน ทรายแม่น้ำ และสารละลายโซเดียมซัลเฟต ***รูปที่ 1*** แสดงลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสานที่ใช้การศึกษาในครั้งนี้ โดย ***รูปที่ 2*** แสดงการกระจายสะสมของขนาดอนุภาค (Size Distribution) ของวัสดุประสานที่ใช้ศึกษาตามลำดับ ส่วนคุณสมบัติองค์ประกอบทางเคมีและค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์และผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษาแสดงใน ***ตารางที่ 1***



ก) ผงหินปูนขนาด 3 μ ข) ผงหินปูนขนาด 15 μ

รูปที่ 1 *ภาพถ่าย SEM ของผงหินปูนที่ใช้ศึกษา (x3,500)*



รูปที่ 2 *การกระจายสะสมของขนาดอนุภาคของวัสดุประสาน*

2.2 สัดส่วนผสม

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้สัดส่วนการผสมของมอร์ต้าร์จำนวน 28 ส่วนผสม โดยใช้ผงหินปูนที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3 และ 15 ไมครอน แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานรวม ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40 และ 0.55 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75:1โดยน้ำหนัก ตลอดการศึกษา รายละเอียดของสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์แสดงใน ***ตารางที่ 2***

2.3 สารละลายซัลเฟต

การศึกษาครั้งนี้ใช้โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เป็นสารละลายซัลเฟต โดยใช้โซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือปริมาณอิออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33,800 ppmใช้โซเดียมซัลเฟต 50 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร โดยเตรียมสารละลายซัลเฟตไว้ล่วงหน้า 1 วัน ก่อนใช้แช่ตัวอย่างที่อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของปริมาตรสารละลายซัลเฟตต่อปริมาตรตัวอย่างที่แช่ประมาณ 4 ต่อ 1 และจัดให้มีการหมุนเวียนสารละลายในถัง

แช่โดยควบคุมค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ให้มีค่าระหว่าง 7.0 – 9.0

ตารางที่ 1 คุณสมบัติองค์ประกอบทางเคมีและค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์และผงหินปูน

องค์ประกอบทางเคมี (% wt)	ปูนซีเมนต์ ประเภท		ผงหินปูน	
	1	5	3μ	15μ
SiO_2	19.62	20.98	1.07	1.09
Al_2O_3	5.18	3.79	0.07	0.07
Fe_2O_3	3.59	3.95	0.02	0.09
CaO	64.17	61.32	54.48	54.30
MgO	1.02	3.75	0.32	0.32
SO_3	2.71	2.76	-	-
LOI	2.52	1.75	43.70	43.60
Na_2O	0.02	0.02	0.02	0.02
K_2O	0.54	0.52	0.01	0.01
Volume Mean diameter, μm	23.09	21.67	3.93	14.11

2.4 การหล่อและบ่มตัวอย่าง

เตรียมแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร เพื่อวัดการขยายตัวตามมาตรฐาน ASTM C1012 โดยหล่อแท่งตัวอย่างลงในแบบหล่อแล้วหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อกันน้ำระเหยออกจากตัวอย่าง และถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (Saturated Lime Water) เป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เตรียมไว้ เพื่อวัดการขยายตัวของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อายุต่างๆ สำหรับสารละลายซัลเฟตจะมีการเปลี่ยนถ่ายที่อายุทุกๆ 2 เดือนของการแช่ตัวอย่าง

2.5 การทดสอบความต้านทานซัลเฟต

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการประเมินความสามารถในการต้านทานซัลเฟตของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์โดยวัดการขยายตัวของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตตาม ASTM C 1012 โดยหลังจากแช่ตัวอย่างในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน ทำการวัดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดความยาว (Length Comparator) ตามมาตรฐาน ASTM C 490 ต่อจากนั้นนำตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เตรียมไว้แล้ว ทำการวัดความยาวของ

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสม (โดยน้ำหนัก)					
		ปูนซีเมนต์ ประเภท		ผงหินปูน (ไมครอน)		ทราย	น้ำ
		1	5	3	15		
1	C1	1.00	-	-	-	2.75	0.40
2	C1-5LP3	0.95	-	0.05	-	2.75	0.40
3	C1-5LP15	0.95	-	-	0.05	2.75	0.40
4	C1-10LP3	0.90	-	0.10	-	2.75	0.40
5	C1-10LP15	0.90	-	-	0.10	2.75	0.40
6	C1-20LP3	0.80	-	0.20	-	2.75	0.40
7	C1-20LP15	0.80	-	-	0.20	2.75	0.40
8	C1	1.00	-	-	-	2.75	0.55
9	C1-5LP3	0.95	-	0.05	-	2.75	0.55
10	C1-5LP15	0.95	-	-	0.05	2.75	0.55
11	C1-10LP3	0.90	-	0.10	-	2.75	0.55
12	C1-10LP15	0.90	-	-	0.10	2.75	0.55
13	C1-20LP3	0.80	-	0.20	-	2.75	0.55
14	C1-20LP15	0.80	-	-	0.20	2.75	0.55
15	C5	-	1.00	-	-	2.75	0.40
16	C5-5LP3	-	0.95	0.05	-	2.75	0.40
17	C5-5LP15	-	0.95	-	0.05	2.75	0.40
18	C5-10LP3	-	0.90	0.10	-	2.75	0.40
19	C5-10LP15	-	0.90	-	0.10	2.75	0.40
20	C5-20LP3	-	0.80	0.20	-	2.75	0.40
21	C5-20LP15	-	0.80	-	0.20	2.75	0.40
22	C5	-	1.00	-	-	2.75	0.55
23	C5-5LP3	-	0.95	0.05	-	2.75	0.55
24	C5-5LP15	-	0.95	-	0.05	2.75	0.55
25	C5-10LP3	-	0.90	0.10	-	2.75	0.55
26	C5-10LP15	-	0.90	-	0.10	2.75	0.55
27	C5-20LP3	-	0.80	0.20	-	2.75	0.55
28	C5-20LP15	-	0.80	-	0.20	2.75	0.55

C1: ตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1, C5: ตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5, LP3: ผงหินปูนขนาดความละเอียด 3 ไมครอน, LP15: ผงหินปูนขนาดความละเอียด 15 ไมครอน, C1-5LP3: ตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนขนาดความละเอียด 3 ไมครอน ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างที่อายุ 2, 3, 4, 8, 13 และ 16 สัปดาห์ หลังจากนั้นทำการวัดความยาวของตัวอย่างทุกๆ อายุ 2 เดือน ของการแช่ในสารละลายซัลเฟต สำหรับการขยายตัวของแท่งตัวอย่างเป็นการเฉลี่ยค่าการขยายตัวจากจำนวน 3 แท่งตัวอย่าง ค่าการขยายตัวของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์คำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\text{การขยายตัว (\%)} = [(L_x - L_i)/L_g] \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

L_i คือค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างหลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน (มิลลิเมตร)

L_x คือค่าเฉลี่ยความยาวของตัวอย่างหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟต (มิลลิเมตร)

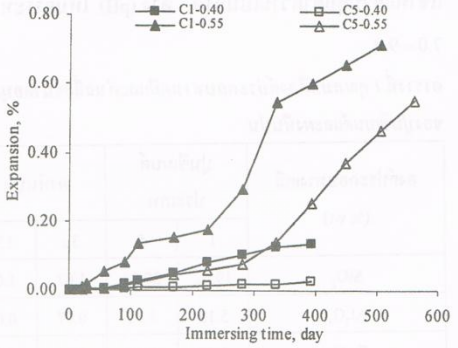
L_g คือค่าความยาวของ Gauge Length หรือเท่ากับ 285 มิลลิเมตร

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

จากผลการทดสอบความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์โดยการประเมินจากค่าการขยายตัวของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ซึ่งพิจารณาจากผลกระทบของชนิดและการแทนที่ของวัสดุประสาน มีรายละเอียดดังนี้

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าน้อยกว่าของตัวอย่างปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 จึงทำให้เกิดปริมาณเอททริงไจท์น้อยกว่า [3] การขยายตัวจึงมีค่าต่ำกว่า และการขยายตัวของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงกว่า (0.55) จะให้ค่ามากกว่าเพราะความพรุนมอร์ต้าร์สูงกว่า จึงทำให้สารละลายซัลเฟตเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า

ในส่วนของการแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนในอัตราร้อยละ 0, 5, 10 และ 20 นั้นพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ***(รูปที่ 4(ก))*** การขยายตัว

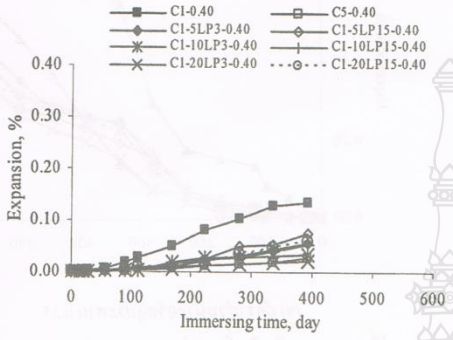


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 ล้วนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55

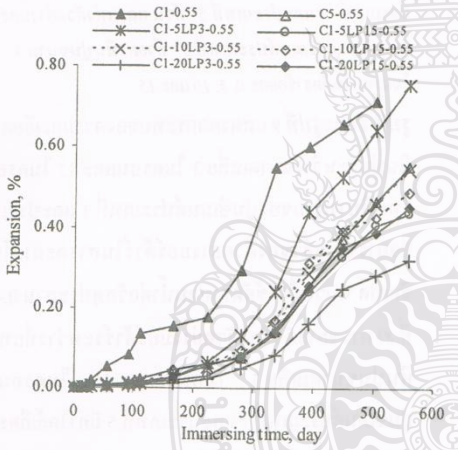
ของแท่งตัวอย่างทุกอัตราการแทนที่มีค่าน้อยกว่ากรณีตัวอย่างปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างการแทนที่ด้วยผงหินปูนนั้นการขยายตัวมีค่าใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับตัวอย่างปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน นั่นแสดงว่าในกรณีใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมต่ำผลกระทบจากชนิดและการแทนที่ของวัสดุประสานจะมีค่าน้อย เนื่องจากผลทางกายภาพด้านการทึบน้ำทำให้สารละลายซัลเฟตเข้าทำลายได้ยากเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ

ส่วนในกรณีน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ***(รูปที่ 4 (ข))*** พบว่าการแทนที่ด้วยผงหินปูนในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ทุกอัตราส่วนทั้ง 3 ไมครอนและ 15 ไมครอน มีค่าการขยายตัวที่น้อยกว่าตัวอย่างปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วนและประเภทที่ 5 ล้วน หรือใกล้เคียงกับตัวอย่างปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ซึ่งอาจเป็นเพราะคุณสมบัติทางกายภาพของผงหินปูน ***(ตารางที่ 1)***และลักษณะการกระจายสะสมของขนาดอนุภาค ***(รูปที่ 2)*** มีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์มาก เมื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์จึงทำให้ขนาดโพรงของซีเมนต์เพสต์มีขนาดเล็กลง กล่าวคือผงหินปูนมีส่วนไปอุดช่องว่างที่มีอยู่ในมอร์ต้าร์ทำให้มีความแน่นมากขึ้น รวมถึงการแทนที่บางส่วนของผงหินปูนช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง จึงเป็นการลดปริมาณของ C_3A และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นผลให้การเกิดปริมาณของเอททริงไจท์

น้อยลง โดยเฉพาะถ้ามีการแทนที่ผงหินปูนในปริมาณที่พอเหมาะแล้ว ซึ่งช่วยทำให้สารละลายซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ช้าลง ดังนั้นการแทนที่ด้วยผงหินปูนจึงให้การขยายตัวของตัวอย่างน้อยกว่าปูนซีเมนต์ล้วนในทุกส่วนผสม



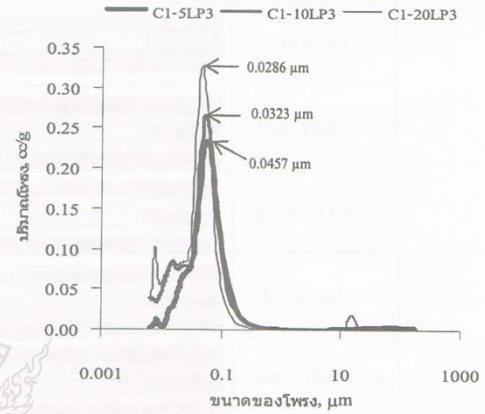
(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

รูปที่ 4 *ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 3 และ 15 ไมครอนในอัตราร้อยละ 0, 5, 10 และ 15*

อย่างไรก็ตามเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน ร้อยละ 5 การขยายตัวของตัวอย่างมีค่ามากกว่าตัวอย่างปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน แต่ยังมีค่าน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับตัวอย่างปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่เมื่อแทนที่ด้วยร้อยละ 20 ค่าการขยายตัวของตัวอย่างค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสัดส่วนผสม ซึ่งเป็นไปได้เพราะขนาดโพรง (Pore Diameter) ของซีเมนต์เพสต์ ***(รูปที่ 5)*** เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน ร้อยละ 5 มีขนาดใหญ่ (0.0457 μm) แต่เมื่อแทนที่ร้อยละ 20 มีขนาดเล็กกว่า (0.0286 μm) ปริมาณปูนซีเมนต์ก็ลดลงด้วย



รูปที่ 5 *ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นปริมาณโพรงในซีเมนต์เพสต์ผสมผงหินปูนขนาด 3 ไมครอนที่ปริมาณต่างๆ*

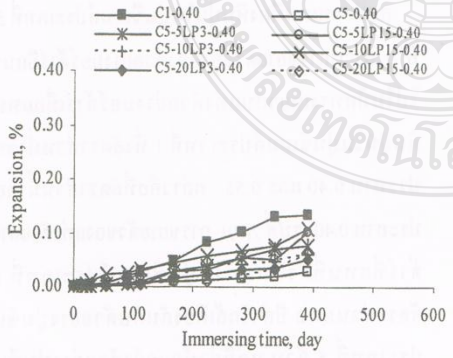
ถ้าพิจารณาจากภาพถ่ายของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ที่อายุ 56 สัปดาห์ในการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ***(รูปที่ 6)*** พบว่าการทำลายของสารละลายซัลเฟตต่อตัวอย่างแท่งมอร์ต้าร์จะให้ผลในทิศทางเดียวกันกับกรณีการขยายตัวของแท่งตัวอย่าง ***(รูปที่ 4(ข))***

กรณีการแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ***(รูปที่ 7)*** พบว่าการขยายตัวของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 กล่าวคือที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ***(รูปที่ 7(ก))*** การขยายตัวของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ทุกอัตราส่วนผสม มีค่าใกล้เคียงกันกับตัวอย่างปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน แต่มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนกรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ***(รูปที่ (7ข))*** การแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ด้วย

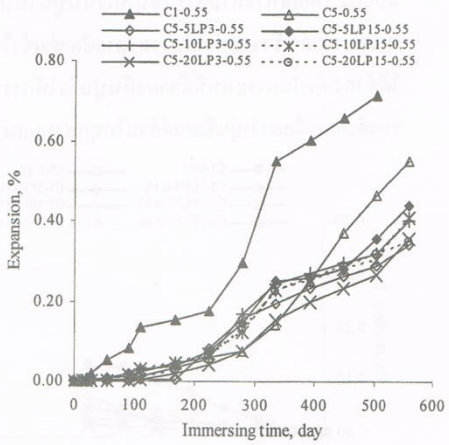
ผงหินปูนจะให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างใกล้เคียงหรือน้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วนโดยเฉพาะที่ระยะเวลาตั้งแต่ 1 ปีขึ้นไป

สัญลักษณ์	ภาพถ่ายแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์
C1 – 0.55	
C5 – 0.55	
C1 - 5LP3 – 0.55	
C1 - 5LP15 – 0.55	
C1 - 10LP3 – 0.55	
C1 - 10LP15 – 0.55	
C1 - 20LP3 – 0.55	
C1 - 20LP15 – 0.55	

รูปที่ 6 ภาพถ่ายแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 3 และ 15 ไมครอนในอัตราร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ที่อายุ 56 สัปดาห์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



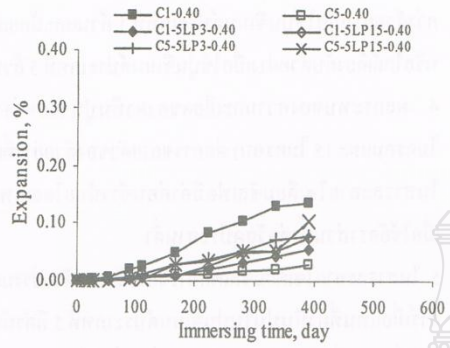
(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



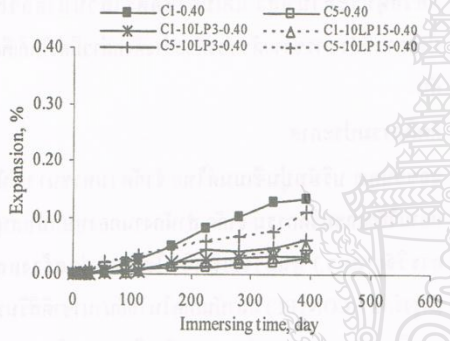
(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ด้วยผงหินปูนขนาด 3 และ 15 ไมครอนในอัตราร้อยละ 0, 5, 10 และ 15

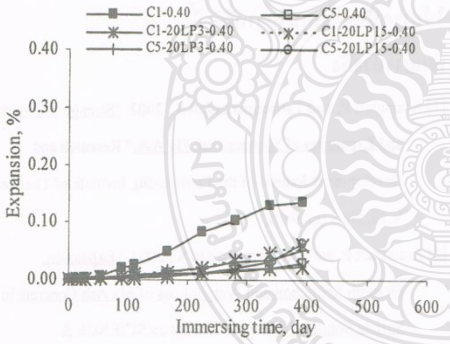
รูปที่ 8 และ***รูปที่ 9*** แสดงผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนระหว่างขนาดเฉลี่ย 3 ไมครอนและ 15 ไมครอน เมื่อแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 (***รูปที่ 8***) การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ระหว่างที่แทนที่ผงหินปูนขนาดเฉลี่ย 3 ไมครอนและ 15 ไมครอนทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าใกล้เคียงกันทุกอัตราการแทนที่ โดยมีค่าใกล้เคียงกันกับการขยายตัวของตัวอย่างปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน แต่มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าผลของความละเอียดของผงหินปูนมีค่าค่อนข้างน้อยกว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ และยังผลให้การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ระหว่างการแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีค่าไม่แตกต่างกัน ส่วนในกรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 (***รูปที่ 9***) พบว่าเมื่อการแทนที่บางส่วนของผงฝุ่นหินปูนที่ขนาดความละเอียด 3 ไมครอนและ 15 ไมครอนในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีผลทำ



(ก) แทนที่ในอัตราร้อยละ 0 และ 5



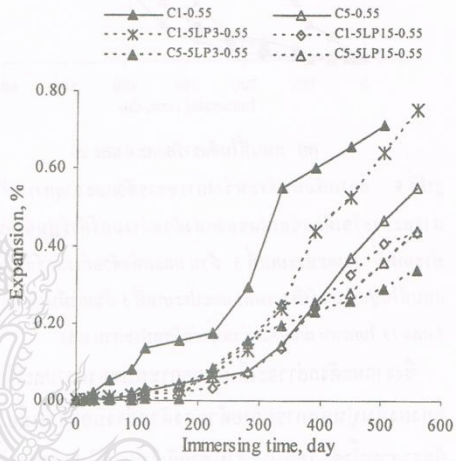
(ข) แทนที่ในอัตราร้อยละ 0 และ 10



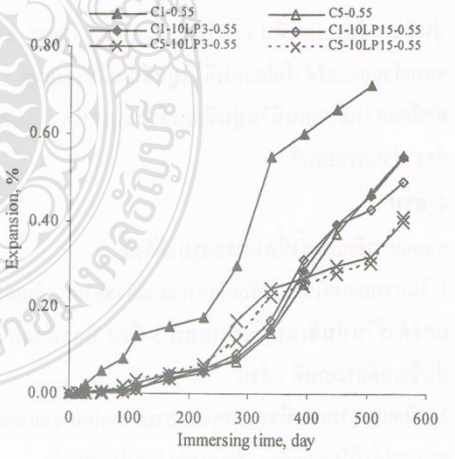
(ค) แทนที่ในอัตราร้อยละ 0 และ 20

รูปที่ 8 *ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ด้วยผงหินปูนขนาด 3 และ 15 ไมครอน เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40*

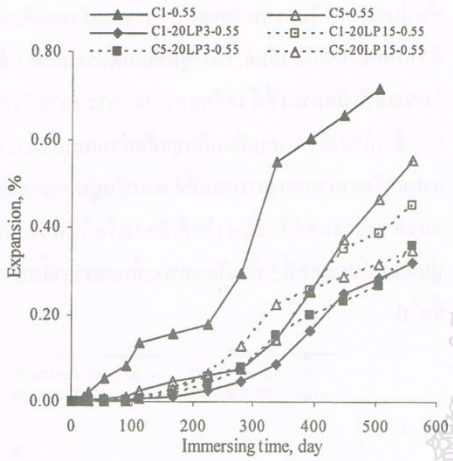
ให้ผลของการขยายตัวเกิดน้อยกว่าในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่อัตราแทนที่ร้อยละเดียวกัน (ยกเว้นเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน ร้อยละ 5 การขยายตัวของตัวอย่างมีค่ามาก ซึ่งใกล้เคียงกับตัวอย่างปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่เมื่อแทนที่ด้วยร้อยละ 20 การขยายตัวมีค่าค่อนข้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับทุกสัดส่วนผสม) อย่างไรก็ตามทุกอัตราส่วนของการแทนที่ด้วยผงหินปูน การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าใกล้เคียงหรือไม่ก็น้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วนโดยเฉพาะที่ระยะเวลาตั้งแต่ 1 ปีขึ้นไป



(ก) แทนที่ในอัตราร้อยละ 0 และ 5



(ข) แทนที่ในอัตราร้อยละ 0 และ 10



(ค) แทนที่ในอัตราร้อยละ 0 และ 20

รูปที่ 9 *ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่1 และประเภทที่ 5 ด้วยผงหินปูนขนาด 3 และ 15 ไมครอน เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55*

ซึ่งจากผลดังกล่าวจะเห็นว่าผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงก็ยังให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาผลของการแทนที่ผงหินปูนระหว่างในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และในปูนซีเมนต์ที่ 5 พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าเมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในทุกอัตราส่วนการแทนที่

4. สรุป

จากผลการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตการขยายตัวของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน
2. ชนิดและการแทนที่ของวัสดุประสานมีผลต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์น้อยเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ
3. ในสารสารละลายโซเดียมซัลเฟต การแทนที่ผงหินปูนทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ในปริมาณที่พอเหมาะทำให้การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วนและน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับตัวอย่างเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน
4. ผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูน (ระหว่าง 3 ไมครอนและ 15 ไมครอน) ต่อการขยายตัวของตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าค่อนข้างน้อยโดยเฉพาะเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ
5. ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าเมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง แต่เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ การขยายตัวของตัวอย่างดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) บริษัทสยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนทุนในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Krammart P. and Tangtermsisrikul 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.

[2] Krammart P. and Tangtermsisrikul S., 2004. "Expansion, Strength Reduction and Weight Loss of Fly Ash Concrete in Sulfate Solution," ASEAN Journal on SCIENCE & TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT, V12

[3] Al-Amoudi, O.S.B., September 1999, "Mechanisms of Sulfate Attack in Plain and Blended Cement," a Review, Proceeding of the International Seminar, University of Dundee, Scotland, UK, pp. 247-260.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายสุขชัย สุขยานุดิษฐ์
วัน เดือน ปีเกิด	9 ธันวาคม 2509
ที่อยู่	11 หมู่ที่ 1 ถนนสุรินทร์-ศรีขรภูมิ กม.16 บ้านเมืองที ตำบลเมืองที อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์ 32000
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์ ปี พ.ศ. 2535
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ. 2535-2546 วิศวกรโครงสร้าง บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล๊อปเมนต์ จำกัด (มหาชน) พ.ศ. 2547-2549 ผู้ช่วยผู้จัดการโครงการ บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล๊อปเมนต์ จำกัด (มหาชน)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี