ผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์

EFFECT OF CONCENTRATION OF SULFATE SOLUTION ON EXPANSION AND WEIGHT LOSS OF MORTAR

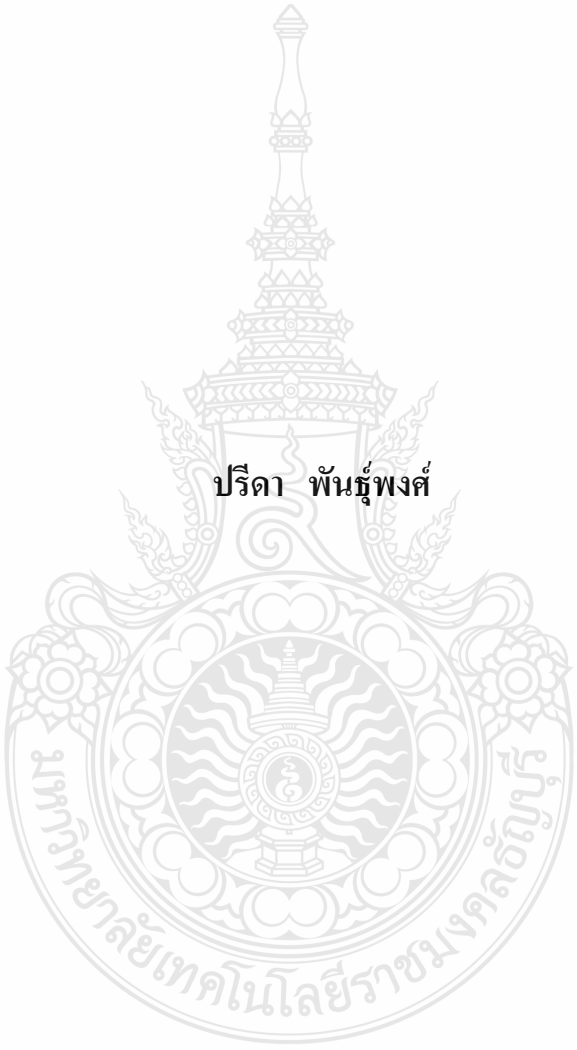
ปรีดา พันธุ์พงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์

ปรีดา พันธุ์พงศ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ Effect of Concentration of Sulfate Solution on Expansion and Weight Loss of Mortar
ชื่อ-นามสกุล	นายปรีดา พันธุ์พงศ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติศานต์ กร้ำมาตร
ปีการศึกษา	2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต)

..... กรรมการ
(ศ.ดร.สมนึก ตั้งเติมสิริกุล)

..... กรรมการ
(ดร.บุญชัย ผึ้งไผ่งาม)

..... กรรมการ
(ผศ.ดร.ปิติศานต์ กร้ำมาตร)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง)
วันที่ 4 เดือนมิถุนายน พ.ศ.2557

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์
ชื่อ-นามสกุล	นายปรีดา พันธุ์พงศ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ำมาตร, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

เนื่องด้วยมาตรฐานการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตนั้น ความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตใช้ที่ความเข้มข้น ร้อยละ5 โดยน้ำหนัก ทำให้ต้องใช้ระยะเวลานานที่จะเห็นผลจากการทำลายตัวอย่างทดลองโดยสารละลายซัลเฟต

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน โดยสารละลายซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ1, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

ผลการศึกษาพบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายซัลเฟตมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ยกเว้นแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaOสูง (ร้อยละ 19.19) ในปริมาณที่น้อย (ร้อยละ 10) ให้ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยกว่า (0.40) ให้ค่าการขยายตัวน้อยกว่าของที่มากกว่า (0.55) และพบว่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมหินปูน หรือผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนให้ค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน โดยการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นน้อย การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่มีความทึบน้ำสูงจะมากกว่ามอร์ต้าที่มีความทึบน้ำต่ำ แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตที่สูง การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่มีความทึบน้ำต่ำ จะมีค่ามากกว่าของที่ทึบน้ำสูง สุดท้ายพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตร้อยละ 20 ยังสามารถประเมินความต้านทานซัลเฟตได้โดยเฉพาะเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ

คำสำคัญ: ความเข้มข้นสารละลายซัลเฟต, การประเมินความต้านทานซัลเฟต, การขยายตัว, การสูญเสียน้ำหนัก

Thesis Title	Effect of Concentration of Sulfate Solution on Expansion and Weight Loss of Mortar
Name - Surname	Mr. Preeda Phanphong
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
Academic Year	2014

Abstract

According to the conventional standards of the study on the sulfate resistance of concrete by using concentrated sulfate solution at a concentration of 5%by weight, it needs quite a long period of time to wait for the results of the experiments.

This research is aimed to study the effect of concentration of sulfate solution on expansion and weight loss of mortar mixed with fly ash and limestone powder. The concentration of sulfate solution of 1% 5% 10% 15% and 20% by weight were used.

The results showed that the expansion of mortar mixed with fly ash and limestone powder in sulfate solution was lower than that of Portland cement mortar. Except the mortar mixture was replaced with high CaO fly ash (19.19%) in quantity less than 10%, the expansion will be greater than Portland cement mortar. The expansion of the mortar using low ratio of water to binder (w/b 0.40) was less than that of mortar using higher ratio of water to binder (w/b 0.55).In addition the weight loss in magnesium sulfate solution of mortar mixed with fly ash was greater than that of Portland cement mortar, while the weight loss of mortar mixed with limestone powder or with fly ash incorporating with limestone powder was similar to that of Portland cement mortar. In magnesium sulfates solution with low concentration, the weight loss of mortar with high permeability was greater than that of low permeability. On the other hand, when using a high concentration of sulfate, weight loss of mortar with low permeability was greater than mortar with high permeability. Finally, it is found that the 20%concentration of sulfate solution can be used to evaluate the sulfate resistance of concrete, especially when the w/b is low.

Keywords: sulfate solution concentration, sulfate resistance evaluation, expansion, weight loss

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติศานต์ กร้ำมาตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.สมนึก ตั้งเติมสิริกุล ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต และดร.บุญชัย ผึ้งไผ่งาม ผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้คำแนะนำให้คำปรึกษา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความกรุณาเอื้อเฟื้อเครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำงานวิจัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่ผู้เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ปรีดา พันธุ์พงศ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... (3)

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... (4)

กิตติกรรมประกาศ ..... (5)

สารบัญ ..... (6)

สารบัญตาราง ..... (8)

สารบัญภาพ ..... (9)

บทที่

1 บทนำ 23

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 23

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 24

1.3 ขอบเขตของการศึกษา 24

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 25

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 26

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 26

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 26

2.1.2 วัสดุปอซโซลาน 29

2.1.3 เถ้าลอย 32

2.1.4 ผงหินปูน 38

2.1.5 การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟต 39

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 42

3 วิธีการศึกษา 46

3.1 วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา 47

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา 47

3.1.2 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา 47

3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา 50

3.3 สัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษา 54

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์	56
4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน	56
4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา	56
4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา	58
4.2 คุณสมบัติการต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์	59
4.2.1 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต	59
4.2.2 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	158
4.3 สรุปผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายซัลเฟต เพื่อแนะนำความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตในการประเมินความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต	183
4.3.1 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต	183
4.3.2 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	186
5 สรุปและข้อเสนอแนะ	188
5.1 สรุป	188
5.2 ข้อเสนอแนะ	189
บรรณานุกรม	190
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)	192
ภาคผนวก ข ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (Mg_2SO_4)	212
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	222
ประวัติผู้เขียน	239

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่างๆ 27
ตารางที่ 2.2 เกณฑ์กำหนดองค์ประกอบทางเคมีของปอซโซลานทั้ง 3 ชั้นคุณภาพ 31
ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 33
ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดคุณลักษณะทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก.2135-2545..... 34
ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 34
ตารางที่ 2.6 ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C618 35
ตารางที่ 2.7 ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติมตามมาตรฐาน ASTM C618 36
ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ 37
ตารางที่ 2.9 ข้อแนะนำสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติในสภาวะแวดล้อมของซัลเฟต 42
ตารางที่ 3.1 การเตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟต 53
ตารางที่ 3.2 การเตรียมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 54
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ (กรัม) ที่ใช้ในการหาความต้านทานซัลเฟต..... 55
ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีของเบลนของวัสดุประสาน ที่ใช้ในการศึกษา 57
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา..... 58
ตารางที่ 4.3 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 ที่อายุการแช่ 80 และ 40 สัปดาห์ 184

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 3.1 ขวดมาตรฐานเลอชาเตอร์ลิเยร์ (Le Chatelier Flask) 47
ภาพที่ 3.2 เครื่องมือแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์ (Air Permeability Apparatus) 48
ภาพที่ 3.3 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม 48
ภาพที่ 3.4 แบบหล่อตัวอย่างขนาด 50×50×50 มม. 48
ภาพที่ 3.5 แบบหล่อตัวอย่างขนาด 25×25×285 มม. 49
ภาพที่ 3.6 เครื่องวัดความยาว (Length Comparator) 49
ภาพที่ 3.7 เครื่องผสมมอร์ต้าร์ 49
ภาพที่ 3.8 ภาพรวมของขั้นตอนการศึกษา 50
ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายขยาย 3,500 เท่าของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา 57
ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียม ซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 60
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียม ซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 61
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียม ซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 63
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียม ซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 64
ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียม ซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 65

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 66

ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 67

ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 68

ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 69

ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 70

ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 72

ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 73

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 74

ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 75

ภาพที่ 4.16 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 76

ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 85

ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 86

ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 88

ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 89

ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 90

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน 0.55 91

ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 93

ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 94

ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 95

ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 96

ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 98

ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 99

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 100

ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 101

ภาพที่ 4.31 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุ 80 สัปดาห์ ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 102

ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 111

ภาพที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 112

ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 113

ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 114

ภาพที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 115

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 116

ภาพที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียม ซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 117

ภาพที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 118

ภาพที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55..... 120

ภาพที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40..... 121

ภาพที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55..... 122

ภาพที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40..... 123

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 124

ภาพที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 125

ภาพที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 126

ภาพที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 127

ภาพที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 128

ภาพที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 129

ภาพที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 130

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 131

ภาพที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 132

ภาพที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 133

ภาพที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 134

ภาพที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 135

ภาพที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55..... 137

ภาพที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55..... 138

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40..... 139

ภาพที่ 4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40..... 140

ภาพที่ 4.60 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55..... 141

ภาพที่ 4.61 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55..... 142

ภาพที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40..... 143

ภาพที่ 4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40..... 144

ภาพที่ 4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55..... 146

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 146

ภาพที่ 4.66 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 147

ภาพที่ 4.67 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 147

ภาพที่ 4.68 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 148

ภาพที่ 4.69 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 148

ภาพที่ 4.70 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 149

ภาพที่ 4.71 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 149

ภาพที่ 4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 20 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 150

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.73 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 150

ภาพที่ 4.74 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 20 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 151

ภาพที่ 4.75 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 151

ภาพที่ 4.76 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 152

ภาพที่ 4.77 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 152

ภาพที่ 4.78 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 153

ภาพที่ 4.79 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 153

ภาพที่ 4.80 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 154

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.81 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55..... 154

ภาพที่ 4.82 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40..... 155

ภาพที่ 4.83 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40..... 155

ภาพที่ 4.84 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55..... 156

ภาพที่ 4.85 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55..... 156

ภาพที่ 4.86 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40..... 157

ภาพที่ 4.87 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40..... 157

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.88 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 เป็นเวลา 80 สัปดาห์ ... 160

ภาพที่ 4.89 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 เป็นเวลา 80 สัปดาห์.... 161

ภาพที่ 4.90 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 เป็นเวลา 80 สัปดาห์.... 162

ภาพที่ 4.91 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 เป็นเวลา 80 สัปดาห์ 163

ภาพที่ 4.92 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 เป็นเวลา 80 สัปดาห์ 164

ภาพที่ 4.93 เปรียบเทียบผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ศึกษาเมื่ออายุของการแช่ 80 สัปดาห์ 165

ภาพที่ 4.94 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 166

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ลักษณะของสิ่งปลูกสร้างในปัจจุบันนั้นโครงสร้างส่วนใหญ่มีคอนกรีตเป็นวัสดุหลักในการก่อสร้าง คอนกรีตในโครงสร้างต่างๆ เหล่านี้อาจเกิดการเสื่อมสภาพหรือขาดความคงทน อันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมหรือสภาพการใช้งานที่ไม่ถูกต้องไม่เหมาะสม การเสื่อมสภาพของคอนกรีตอาจเกิดขึ้นเมื่อเริ่มใช้งานหรือบางครั้งอาจเกิดขึ้นหลังจากใช้งานโครงสร้างคอนกรีตนั้นไปแล้วช่วงหนึ่ง และการเสื่อมสภาพนี้อาจเกิดมาจากหลายสาเหตุ ได้แก่ สาเหตุทางกายภาพ สาเหตุทางเคมี สาเหตุทางกล สาเหตุทางชีวภาพ และสาเหตุโดยรวม [1] ในส่วนการกัดกร่อนโดยซัลเฟต (Sulfate Attack) เป็นสาเหตุหลักอย่างหนึ่งทางเคมีที่มีผลต่อความเสื่อม สภาพของคอนกรีต ซัลเฟตที่พบมากตามธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อคอนกรีตชนิดที่พบมากที่สุดมักจะเป็น โซเดียมซัลเฟต รองลงมาก็คือแมกนีเซียมซัลเฟต เนื่องจากเกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) ที่อยู่ในรูปของสารละลายซัลเฟต สามารถซึมผ่านช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต เข้าทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตหรือมอร์ต้าร์ได้ โดยซัลเฟตจะทำให้คอนกรีตเกิดการผุกร่อน พองตัว และแตกร้าว ส่งผลให้คอนกรีตรับแรงลดลง และทำให้โครงสร้างนั้นมีอายุการใช้งานสั้นกว่าที่ออกแบบไว้ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายโดยซัลเฟตนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของซัลเฟต ความทึบน้ำและปริมาณ $Ca(OH)_2$ ของคอนกรีต รวมถึงปริมาณ C_3A และ C_4AF ของปูนซีเมนต์

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตปูนซีเมนต์และคอนกรีตอยู่หลายชนิด ตัวอย่างเช่น เถ้าลอย ผงหินปูน และผงซิลิกา เป็นต้น เพื่อลดต้นทุนและปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่ง มีอนุภาคเล็กความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์เล็กน้อย ลักษณะทั่วไปเป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.001-0.150 มม. ความละเอียดของเถ้าลอยในประเทศไทยอยู่ในช่วง 2,500-3,500 cm^2/g เป็นที่ทราบกันดีว่าเถ้าลอยเมื่อใช้ในงานคอนกรีตมีข้อดีอยู่หลายประการ คือ ถ้าใช้ในปริมาณที่เหมาะสม จะช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ ลดการสูญเสียการยุบตัว เพิ่มกำลังในระยะยาว และเพิ่มความคงทนหลายอย่าง อย่างไรก็ดี ข้อเสียหลักของเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของคอนกรีตก็คือ จะทำให้ก่อตัวช้า กำลังในระยะต้นต่ำ จึงไม่นิยมใช้เถ้าลอยในงานที่ต้องการเร่งกำลัง หรือในสภาวะงานที่ต้องการถอดแบบหล่อคอนกรีตให้เร็วขึ้น [2, 3, 4] ในขณะที่ผงหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถหาได้ในประเทศไทย และมีจุดเด่นแตกต่างจากเถ้าลอยอยู่หลายประการ จุดเด่นที่สำคัญคือ ทำให้การก่อตัวของคอนกรีตเร็วขึ้น กำลังในระยะต้นสูงขึ้น จึงเป็นวัสดุที่เหมาะเป็นอย่างยิ่งสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการก่อตัวเร็ว และเร่งกำลัง ผงหินปูนหรือผงแคลเซียมคาร์บอเนตยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติหลายอย่างของคอนกรีตได้ เช่น ลดการเยิ้มน้ำ ลดการหดตัว

เพิ่มความต้านทานซัลเฟต และความต้านทานกรด เป็นต้น [4, 5, 6] การพัฒนาวัสดุประสานร่วมระหว่างปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน เป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ร่วมกันเพื่อให้คอนกรีตมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเฉพาะการต้านทานสารซัลเฟต

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับเรื่องผลกระทบจากซัลเฟตในระยะยาวที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตนั้น ตามมาตรฐานได้ใช้สารละลายซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก สำหรับแช่ตัวอย่างทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบ ซึ่งทำให้ต้องใช้ระยะเวลานาน ในการที่จะเห็นผลจากการทำลายตัวอย่างทดลองโดยสารละลายซัลเฟต ดังนั้น เพื่อให้ผลจากการทำลายของสารซัลเฟตเห็นผลได้เร็วขึ้น สำหรับการศึกษาวิจัยนี้ จึงได้ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตที่มีต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้ความเข้มข้นที่แตกต่างกันคือร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ถึงผลความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต ต่อการต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย และผงหินปูน

1.2.2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ในสารละลายซัลเฟตที่มีความเข้มข้นต่างกัน

1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

1.2.4 เพื่อศึกษาความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตที่เป็นไปได้ในการลดระยะเวลาที่ใช้ประเมินการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาของงานวิจัยครั้งนี้มีขอบเขตงานวิจัยดังนี้

1.3.1 วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผงหินปูน และเถ้าลอย

1.3.2 การแทนที่ของเถ้าลอยและผงหินปูนจะใช้แทนที่ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 โดยแทนที่วัสดุประสาน 2 ชนิด (แทนที่ปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยและแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยผงหินปูน) และวัสดุประสาน 3 ชนิด (แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยร่วมผงหินปูน)

1.3.3 ในการประเมินความต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตนั้น ใช้การวัดการขยายตัว (Expansion) การสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ที่อายุ 2, 3, 4, 8, 13 และ 16 สัปดาห์ และทุกๆ อายุ 2 เดือน ของการแช่ในสารละลายซัลเฟต

1.3.4 สารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ ใช้โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) เป็นสารละลายซัลเฟต โดยใช้ความเข้มข้นที่ต่างกันคือร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20

1.3.5 ทำการวัดการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟต

1.3.6 เปรียบเทียบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟต

1.3.7 วิเคราะห์ผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์

1.3.8 วิเคราะห์ผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่

1.4.1 ทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

1.4.2 ทราบถึงการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีการผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างกัน

1.4.3 ทราบถึงผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

1.4.4 เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้คอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนให้เหมาะสมสำหรับการต้านทานสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

1.4.5 เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต เพื่อลดระยะเวลาการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างคอนกรีตต่อไป

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วย ออกไซด์ 2 กลุ่ม คือ ออกไซด์หลัก (Major Oxides) และออกไซด์รอง (Minor Oxides) ออกไซด์หลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิก้า (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันได้กว่าร้อยละ 90 ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รอง (Minor Oxides) ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์(MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na_2O) และ (K_2O) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และยังมีส่วนประกอบของออกไซด์อื่นผสมอยู่บ้าง เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) และฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5) นอกจากนี้ยังมีสิ่งที่แปลกปลอมและส่วนประกอบอื่น ซึ่งจะจัดรวมอยู่ในการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue) ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากัน และรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารละลายที่มีรูปร่างต่างๆ ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ การเผา และการเย็นลงของเม็ดปูน

2.1.1.1 สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์

สารประกอบออกไซด์ของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมี และรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีรูปร่างต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบการเผา และการเย็นลงของเม็ดปูน ปริมาณสาร ประกอบสำคัญในปูนซีเมนต์มีปริมาณมากถึงกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ สารประกอบที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด ดังนี้

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO.SiO_2$ หรือ C_3S)

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึกสีเทาแก่ คุณสมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกตนี้ เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัว และแข็งตัวให้กำลังค่อนข้างดีโดยเฉพาะ 7 วันแรก โดยปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 45 ถึง 55

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO.SiO_2$ หรือ C_2S)

ไดแคลเซียมซิลิเกตมีหลายรูปแบบ โดยที่อุณหภูมิปกติ C_2S จะอยู่ในรูปเบต้าไดแคลเซียม ซิลิเกต (βC_2S) ไดแคลเซียมซิลิเกตมีลักษณะเป็นเม็ดกลม มีคุณสมบัติ เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวและพัฒนากำลังอัดอย่างค่อนข้างช้าและช้ากว่า C_3S มาก แต่ในระยะยาวจะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับ C_3S โดย ปริมาณไดแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 15 ถึง 35

3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3$ หรือ C_3A)

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมสีเทาอ่อน ทำปฏิกิริยากับน้ำมีความรุนแรงมากและทำให้ก่อตัวทันที (Flash Set) การพัฒนากำลังเร็วภายใน 1 ถึง 2 วัน แต่กำลังค่อนข้างต่ำ ปริมาณเมื่อเทียบกับ C_3S และ C_2S โดยปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 7 ถึง 15

4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ หรือ C_4AF)

เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์อยู่ในสภาพสารละลายแข็ง (Solid Solution) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็วภายในไม่กี่นาที แต่กำลังค่อนข้างต่ำ และต่ำกว่า C_3A โดยปริมาณของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 5 ถึง 10

2.1.1.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีหลายประเภท แต่ละประเภทมีสารประกอบสำคัญ ได้แก่ C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF, CaO และ MgO ซึ่งจะมีอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน จึงทำให้ปูนซีเมนต์แต่ละประเภทมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ส่วนประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ชนิดต่างๆ แสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.1 ซึ่งปูนซีเมนต์ที่ผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่จะผลิตตามมาตรฐานของอเมริกา (ASTM C. 150) และของประเทศอังกฤษ (British Standard; B.S.) ซึ่งตามมาตรฐาน มอก.15 ของไทยได้แบ่งปูนซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่างๆ [7]

ชนิดของปูนซีเมนต์	ส่วนประกอบทางเคมี (ร้อยละ)						
ตามมาตรฐาน ASTM	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	$CaSO_4$	CaO	MgO
Type I (Normal)	49	25	12	8	2.9	0.8	2.4
Type II (Modified)	45	29	6	12	2.8	0.6	3.0
Type III (High Early Strength)	56	15	12	8	3.9	1.4	2.6
Type IV (Low Heat)	30	46	5	13	2.9	0.3	2.7
Type V (Sulfate Resistant)	43	36	4	12	2.7	0.4	1.6

2.1.1.3 ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

1. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกต เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $3CaO.2SiO_23H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide: $Ca(OH_2)$ หรือ CH) ดังสมการที่ 2.1

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_23H_2O + 3Ca(OH)_2 \qquad (2.1)$$

2. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH ดังสมการที่ 2.2

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_23H_2O + Ca(OH)_2 \qquad (2.2)$$

3. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดและทำให้เพสต์ ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2.3

$$3CaO.Al_2O_3) + 6H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_36H_2O \qquad (2.3)$$

เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ จึงใส่ ยิปซั่มเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (Clinker) โดยยิปซั่ม (Gypsum : $CaSO_4.2H_2O$) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนต ก่อให้เกิดชั้นบางๆ ของแอทริงไจท์ (Ettringite : $3CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.31H_2O$) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต ดังสมการที่ 2.4

$$3CaO.Al_2O_3 + Ca.SO_4.2H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.31H_2O \qquad (2.4)$$

4. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้นจะทำปฏิกิริยากับยิปซั่ม ดังสมการที่ 2.5

$$4CaO.Al_2O_3Fe_2O_3 + Ca.SO_4.2H_2O \rightarrow CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3).3CaSO_4 \qquad (2.5)$$

เนื่องจากปูนซีเมนต์มี C_3S เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ ซึ่งบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ C_3A ด้วย ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะลดลง เนื่องจากการเกิดชั้นเคลือบของแอทริงไจท์ และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มของอิออนแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาลดลง และเพสต์มีสภาพพลาสติกช่วงหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึกและปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ทำให้เกิด CSH เพิ่มมากขึ้นตามด้วยปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้แอทริงไจท์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมิเนตและเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต และซัลโฟเฟอไรท์ แคลเซียมซิลิเกตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น และขยายเข้าไปในโพรง และเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.1.2 วัสดุปอซโซลาน

2.1.2.1 ความหมายของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) เป็นวัสดุเพิ่มแร่ธาตุ ซึ่งมีองค์ประกอบของธาตุหลักเป็นซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ/หรือเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันเป็นปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุนั้นๆ นอกจากนี้ปอซโซลานอาจจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย เมื่อบดเป็นผงละเอียดสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาวที่อุณหภูมิปกติและเมื่อมีความชื้นจะเกิดเป็นสารประกอบ ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสาน

ตามมาตรฐาน ASTM C618-84 นิยาม ปอซโซลาน (Pozzolan) ว่าหมายถึง วัตถุที่ประกอบด้วย ซิลิก้า หรือซิลิก้าผสมกับอลูมิน่า ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นซิเมนต์อยู่น้อยหรือไม่มี แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้น ปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับปูนขาว และจะทำให้เกิดสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นซีเมนต์ (Cementations Material) ยกตัวอย่างเช่น เถ้าลอย เถ้า แกลบ ดินขาว เป็นต้น

ปอซโซลานเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างมาตั้งแต่สมัยโบราณกว่า 2,000 ปีแล้ว และในปัจจุบันยังเป็นที่นิยม ในสมัยโบราณมีการนำวัสดุพวกปอซโซลาน เช่น เถ้าจากภูเขาไฟมาผสมกับปูนขาวเพื่อผลิตเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) และมีรายงานว่าได้มีการใช้ส่วนผสมของปอซโซลาน 2 ส่วน ต่อปูนขาว 1 ส่วน มาใช้ในการก่อสร้าง โดยมีไขมัน นม และเลือดจากสัตว์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการใช้งาน และสิ่งก่อสร้างที่ทำจากปอซโซลานนั้นก็ยังมีความคงทนมาจนถึงทุกวันนี้

ในปัจจุบันวัสดุปอซโซลานที่นำมาผสมกับผงซีเมนต์มีมากมาย เช่น ดินเหนียว ดินดาน ผงถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าลอย แต่ที่นิยมนำมาใช้มากที่สุดคือ เถ้าลอย (Fly Ash) ที่ได้จากเตาเผาของโรงไฟฟ้า เพราะมีปริมาณมากและเมื่อนำมาผสมกับซีเมนต์เพสต์แล้วมีคุณสมบัติด้านรับแรงอัดได้สูงขึ้น โดยสัดส่วนของปอซโซลานที่ใช้ควรอยู่ระหว่าง 15-50% ของน้ำหนักของปูนซีเมนต์ทั้งหมด โดยประโยชน์ที่นำวัสดุปอซโซลานมาผสมมีดังนี้

1. ทำให้คอนกรีตมีการขยายตัวน้อย มีความทึบน้ำสูง

2. ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยากับน้ำต่ำ เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาจึงเหมาะสำหรับงานคอนกรีตหลา

3. มีอัตราการพัฒนาแรงอัดช้าเนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆ แต่ให้แรงอัดในระยะหลังเท่ากันหรืออาจมากว่าเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา โดยบ่มชื้นให้นานกว่าปกติ

4. ทนทานต่อการกัดกร่อนของสารประกอบผงซัลเฟตได้ดีอีกด้วย

2.1.2.2 ชนิดของวัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลานมีสองชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Pozzolan) และปอซโซลานดัดแปลง (Modify Pozzolan) มีรายละเอียดดังนี้

1. ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ได้แก่ หินดินดาน (Shales) เศษหินภูเขาไฟ (Tuff) เถ้าภูเขาไฟ (Volcanic Ash) หินภูมิไซท์ (Pumisite) หินโอเพิลเหลือง (Opaline) หินชั้น (Shale) หินเชิร์ต (Chert) หินปูน (Limestone) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเมื่อต้องการนำไปใช้งานจะต้องนำมาบดก่อน

2. ปอซโซลานดัดแปลง (Modify Pozzolan)

ปอซโซลานดัดแปลงเกิดจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (by products) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้น ซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบันปอซโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซิลิกาฟูม (Silica Fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

ตาม ASTM C 618 ได้จำแนกปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ (ตารางที่ 2.2) ได้แก่

1. ชั้นคุณภาพ N เป็นปอซโซลานจากธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านขบวน การเผาแล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ

2. ชั้นคุณภาพ F เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) เถ้าลอยในชั้นคุณภาพนี้มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน

3. ชั้นคุณภาพ C เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) หรือซับบิทูมินัส (Subbituminous) เถ้าลอยในชั้นคุณภาพนี้นอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานแล้วยังมีคุณสมบัติเหมือนกับปูนซีเมนต์อีกด้วย คือสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดแรงยึดประสานได้เลย เถ้าลอยในชั้นคุณภาพนี้อาจมี ปูนขาวปนอยู่มากกว่า 10%

ตารางที่ 2.2 เกณฑ์กำหนดองค์ประกอบทางเคมีของปอซโซลานทั้ง 3 ชั้นคุณภาพ

องค์ประกอบ	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ผลรวมของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ไอร์ออนออกไซด์ (Fe_2O_3), ไม่น้อยกว่า ร้อยละ	70.0	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3), ไม่เกิน ร้อยละ	4.0	5.0	5.0
ความชื้น, ไม่เกิน ร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียเนื่องจากการเผา, ไม่เกิน ร้อยละ	6.0	6.0	6.0

2.1.2.3 ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานได้เล็กน้อยหรืออาจไม่มีเลย แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิด ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) สรุปเป็นสมการทางเคมีได้ ดังสมการที่ 2.6 ถึง 2.7

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$3Ca(OH)_2+2SiO_2 \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O \text{ หรือ (CSH)} \qquad (2.6)$$

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมี เป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$3Ca(OH)_2+2Al_2O_3 \rightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O \text{ หรือ (CAH)} \qquad (2.7)$$

2.1.3 เถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นผลพลอยได้ (By Products) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผา เพื่อเอาพลังงานความร้อนมาใช้ เถ้าถ่านหินที่มี ขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงก้นเตา จึงเรียกกันว่าเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึงประมาณ 200 ไมโครเมตร จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย (Fly Ash) เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบบริเวณโรงไฟฟ้า

เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ใช้ผสมปูนซีเมนต์ทำคอนกรีตได้ ตามมาตรฐาน ASTM C 618-80 ได้ให้คำนิยามของเถ้าลอยไว้ว่า เถ้าลอย คือวัสดุเม็ดละเอียดที่เหลือจาก การเผาไหม้ของถ่านหิน โดยส่วนมากจะได้มาจากขบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหิน ถ่านหินที่ใช้ในการเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด เช่น แอนทราไซต์ (Anthracite) บิทูมินัส (Bituminous) ซับบิทูมินัส (Sub Bituminous) และลิกไนต์ (Lignite) โดยถ่านหินคุณภาพดีที่สุด ได้แก่ แอนทราไซด์ สามารถให้ความร้อนสูงสุด และมีปริมาณความชื้นต่ำ ตามด้วยบิทูมินัส ซับบิทูมินัส และลิกไนต์ ตามลำดับ โดยลิกไนต์ให้ความร้อนต่ำและมีความชื้นสูง นอกจากถ่านหินทั้ง 4 ชนิดแล้ว ยังมีพีท (Peat) ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุด ให้ความร้อนต่ำสุด และมีความชื้นสูงสุด จึงไม่นิยมใช้ใน การเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า โดยเมื่อเผาถ่านหินลิกไนต์แล้วจะเหลือเถ้าถ่านหินประมาณ ร้อยละ 25 ของปริมาณถ่านหินที่เผา โดยสามารถแบ่งเถ้าถ่านหินหินลิกไนต์ได้ดังนี้

2.1.3.1 เถ้าลอย (Fly Ash or Pulverized Fuel Ash or Dry Ash)

เถ้าลอยเป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกไปสู่ปล่องควัน และถูกดักจับไว้ได้ในเครื่องดักจับ (Electrostatic Precipitator) โดยจะมีประมาณร้อยละ 82 ของปริมาณเถ้าทั้งหมด

2.1.3.2 เถ้าหนัก (Bottom Ash or Wet Ash)

เถ้าหนักเป็นเถ้าที่เกิดจากการปะทะกันของอนุภาคเถ้าในบริเวณสันดาป (Combustion Zone) โดยในบริเวณนี้อุณหภูมิจะสูงพอที่จะหลอมเถ้าที่เป็นเม็ดหรือก้อนตกลงสู่ก้นเตา โดยมีประมาณร้อยละ 18 ของเถ้าทั้งหมด

2.1.3.3 ขี้เถ้า (Slag)

ขี้เถ้าเป็นเถ้าที่ปะทะกับผนังเตาและหลอมติดกันรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ เมื่อรวมตัวกันจนมีน้ำหนักมากจะตกลงสู่ก้นเตา ซึ่งขี้เถ้ามีปริมาณน้อยมาก

1. ชนิดของเถ้าลอย

มาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1) เถ้าลอย ชนิด F (Class F)

เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica : SiO_2) และอลูมินา (Alumina : Al_2O_3) และเฟอร์ริคออกไซด์ (Ferric Oxide : Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.3 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide : CaO) ต่ำ ดังนั้น จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนียวและควอตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูง จึงให้เถ้าลอยที่มี SiO_2 สูง

2) เถ้าลอย ชนิด C (Class C)

เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.3 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วย ดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำ ทำให้เถ้าลอย ชนิด C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้ว ยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 [8]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์ ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) อย่างต่ำ, ร้อยละ	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างสูง, ร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง, ร้อยละ	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na_2O, ร้อยละ	1.5	1.5

นอกจากจะแบ่งแยกชนิดของเถ้าถ่านออกเป็น 2 ชนิด ดังกล่าว ยังสามารถพิจารณาจากความแตกต่างของส่วนประกอบและคุณสมบัติในด้านความเป็นซีเมนต์ (Cementations) และความเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) ได้ด้วย เนื่องจากเถ้าลอย Class C โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์เพิ่มขึ้น จากคุณสมบัติปอซโซลาน เพราะเถ้าถ่านหิน Class C มักจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าร้อยละ 10 ส่วน Class F มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 10 ดังนั้นการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ในงานคอนกรีตธรรมดาทั่วไป ACI 226 (1987) ได้แนะนำว่าควรใช้เถ้าถ่านหิน Class F ในปริมาณร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และสามารถเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15 ถึง 35 ได้ในกรณีที่ใช้เถ้าถ่านหิน Class C เนื่องจากพบว่าเถ้าถ่านหิน Class C จะมีลักษณะความเป็นซีเมนต์มากกว่า เพราะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ สูงกว่าเถ้าถ่านหิน Class F

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ (มอก.) กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่ม หรือใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก โดยแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมีได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพ ดังตารางที่ 2.4

1. ชั้นคุณภาพ 1 ใช้สำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการคุณภาพดีเป็นพิเศษ
2. ชั้นคุณภาพ 2 ใช้สำหรับคอนกรีตทั่วๆ ไป แบ่งออกเป็น 2 ชนิด
   - ชนิด ก
   - ชนิด ข
3. ชั้นคุณภาพ 3 ใช้สำหรับงานที่ต้องการกำลังอัดไม่สูง เช่น งานสำหรับคอนกรีตเขื่อน งานคอนกรีตหยาบ

ซึ่งคุณลักษณะทั้งทางเคมีและคุณลักษณะทางฟิสิกส์นั้นมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดคุณลักษณะทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด			
	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้นคุณภาพ 3
		ชนิด ก	ชนิด ข	
ปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อย่างต่ำ, ร้อยละ	30.0	30.0	30.0	30.0
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO), ร้อยละ	-	น้อยกว่า 10.0	น้อยกว่า 10.0	-
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างมาก, ร้อยละ	5.0	5.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด อย่างมาก, ร้อยละ	3.0	3.0	2.0	2.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างมาก, ร้อยละ	6.0	6.0	6.0	6.0

ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 [8]

ข้อกำหนดทางเคมี	**ชนิด**		
	N	**F**	**C**
1. SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 อย่างต่ำ, ร้อยละ	70.0	70.0	50.0
2. SO_3 อย่างสูง, ร้อยละ	4.0	5.0	5.0
3. ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0	3.0
4. การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) สูงสุด, ร้อยละ	10.0	6.0	6.0
5. ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบ Na_2O ร้อยละ	1.5	1.5	1.5

ตารางที่ 2.6 ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C618 [8]

ข้อกำหนดทางกายภาพ	ชนิด		
	N	F	C
ปริมาณที่ค้างแร่งเบอร์ 325[A] ร่อนโดยใช้น้ำสูงสุดร้อยละ	34	34	34
ดัชนีกำลังเมื่อผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์			
ที่อายุ 7 วัน อย่างต่ำร้อยละส่วนผสมควบคุม	75[B]	75[B]	75[B]
ที่อายุ 28 วัน อย่างต่ำร้อยละส่วนผสมควบคุม	75[B]	75[B]	75[B]
ความต้องการน้ำสูงสุดร้อยละของส่วนผสมควบคุม	115	115	115
ความคงตัว (Soundness)[C] :			
การขยายตัวหรือหดตัวออโตเคลฟสูงสุดร้อยละ	0.8	0.8	0.8
ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ[D] :			
ความหนาแน่น ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5
ร้อยละที่ค้างแร่งเบอร์ 325 ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5

หมายเหตุ A ระวังไม่ให้มีผงละเอียดที่เกาะตัวกันเป็นก้อนค้างอยู่บนแร่ง

B เป็นไปตามข้อกำหนดเมื่อดัชนีกำลังที่อายุ 7 หรือ 8 วัน เป็นไปตามข้อกำหนด

C ถ้ามีสารปอซโซลานผสมเกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ในคอนกรีตชิ้นส่วนสำหรับทดสอบ การขยายตัว ออโตเคลฟควรมีสารปอซโซลานผสมอยู่ร้อยละของสารซีเมนต์ตามนั้น

D ความหนาแน่น (Density) และความละเอียดของตัวอย่างแต่ละอันต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้าทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึงสิบตัวอย่าง

ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำสำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนียวและถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี SiO_2 สูง

ตารางที่ 2.7 ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติมตามมาตรฐาน ASTM C618 [8]

ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม	ชนิด		
	N	F	C
แฟคเตอร์ผลคูณ (Multiple Factor) ผลคูณของ LOI กับปริมาณที่ค้างแร่งเบอร์ 325 เมื่อร่อนโดยใช้น้ำสูงร้อยละ		255	
การหดตัวแห้งที่ 28 วัน ของแท่งมอร์ต้าร์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ควบคุม สูงสุดร้อยละ	0.3	0.3	0.3
ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอเมื่อใช้สารกักกระจายอากาศ ปริมาณสารกักกระจายอากาศที่ทำให้ปริมาณอากาศร้อยละ 18.0 จะต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้านี้ หรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้านี้ทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึงสิบตัวอย่าง ไม่เกินร้อยละ	20	20	20
ประสิทธิภาพในการควบคุมปฏิกิริยาอัลคาไลมวลรวม การขยายตัวที่ 14 วัน เมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมควบคุมด้วยปูนซีเมนต์อัลคาไลต่ำ, สูงสุดไม่เกินร้อยละ	100	100	100
ประสิทธิภาพในการช่วยการต้านทานสารซัลเฟต 1			
วิธีที่ 1 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ:			
- สภาวะซัลเฟตปานกลาง 6 เดือน, สูงสุดไม่เกินร้อยละ	0.1	0.1	0.1
- สภาวะซัลเฟตสูง 6 เดือน, สูงสุดไม่เกินร้อยละ	0.05	0.05	0.05
วิธีที่ 2 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ:			
- เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ทนซัลเฟตในสภาวะซัลเฟต 6 เดือน สูงสุดไม่เกินร้อยละ	100	100	100

หมายเหตุ ปริมาณปอซโซลานที่ถือว่ามีประสิทธิภาพในการช่วยต้านทานซัลเฟตที่จะต้องอยู่ภายในร้อยละ ± 2 ของการทดสอบหรือระหว่างสองค่าของการทดสอบที่อยู่ในเกณฑ์

เถ้าลอยในประเทศไทยสามารถพบได้ทั้ง Class C และ Class F ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา และลักษณะ การเผาถ่านหิน อย่างไรก็ดีต่างก็มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีต เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ มีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ [9]

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

2.1.3.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประกอบด้วย ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก และมีแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na_2O, K_2O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition : LOI) SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักมีปริมาณถึงร้อยละ 80-90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 ของเถ้าลอยไว้อย่างต่ำร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปใช้งานได้

2.1.3.5 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เถ้าลอยทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต กล่าวคือเมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิด ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในเถ้าลอย เกิดเป็นสาร ประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9

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

$$3Ca(OH)_2+2Al_2O_3 \rightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O \text{ หรือ (CAH)} \quad (2.9)$$

2.1.4 ผงหินปูน

ผงหินปูน (Limestone Powder) เป็นผลพลอยได้จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยปกติแล้วผงหินปูนจำนวนมากเหล่านี้มักจะถูกกองเก็บไว้ในบริเวณแหล่งหินย่อยๆ นั้น โดยอนุภาคของผงหินปูน มีขนาดเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 100 ถึง 1 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถก่อให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อมและยังส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของผู้ที่อยู่อาศัยในบริเวณใกล้เคียงแหล่งย่อยหินเหล่านั้น สำหรับผงหินปูนในประเทศไทยมีเหมืองที่ทำการผลิตอยู่ 2 แหล่งใหญ่ ด้วยกันคือ เหมืองหินปูนโดโลมิติก จังหวัดสระบุรี และผงหินปูนจากเหมืองหินปูนชนิดโดโลไมท์ จังหวัดกาญจนบุรี หินปูนชนิดโดโลมิติก (Dolomitic) และโดโลไมท์ (Dolomite) จัดอยู่ในจำพวกหินคาร์บอเนต (CarbonateRock) โดยหินคาร์บอเนตที่มีองค์ ประกอบของแร่โดโลไมท์ อยู่ในปริมาณร้อยละ 10-50 จะจัดเป็นหินปูนประเภทโดโลมิติก ในขณะที่มีปริมาณของแร่โดโลไมท์มากกว่าร้อยละ 50 จะจัดเป็นหินปูนประเภทโดโลไมท์ สำหรับองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของหินปูน จะประกอบด้วย สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (Inert Material) และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Reactive Material) มีรายละเอียดดังนี้

2.1.4.1 วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุเองที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี จึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตอีกด้วย ในขณะเดียวกันก็อาจส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนต์เพสต์ สารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี อย่างไรก็ตาม สารประกอบดังกล่าวสามารถที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ ถ้าสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากเพียงพอ ให้พลังงานความร้อน และยังช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ดังสมการที่ 2.10 และ 2.11

$$CaCO_3 + H_2O + \text{heat} \rightarrow Ca(OH)_2 + CO_2 \quad (2.10)$$

$$MgCO_3 + H_2O + \text{heat} \rightarrow Mg(OH)_2 + CO_2 \quad (2.11)$$

2.1.4.2 วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำดังสมการที่ 2.12

$$CaCO_3 + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \qquad (2.12)$$

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

การนำเอาผงหินปูนและวัสดุปอซโซลานมาใช้ในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ จึงมีความเป็นไปได้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาว อย่างไรก็ตาม ปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานจากแหล่งต่างๆ เมื่อนำ มาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อทราบถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุเชื่อมประสาน ซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ที่มีส่วนผสมของวัสดุทั้งสองให้แน่ชัดก่อนการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2.1.5 การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

สำหรับกลไกการทำลายของซัลเฟตต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Mechanisms of Sulfate Attack on Portland Cement) นั้น เนื่องจากเกลือซัลเฟต (SO_4^{-2}) ที่อยู่ในรูปของสารละลายสามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ ตัวอย่างของเกลือซัลเฟต ที่พบมากในธรรมชาติและอันตรายต่อคอนกรีต เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) เป็นต้น เกลือซัลเฟตจะมีอยู่มากในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในบริเวณริมทะเลหรือในดิน ทั่วไปใน น้ำเสียจากบ้านเรือน หรือตามน้ำพุร้อนธรรมชาติ เป็นต้น

ในการศึกษาเรื่องการทำลายโดยซัลเฟต สามารถทำได้โดยนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายโซเดียม ซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต หรือแคลเซียมซัลเฟต แต่เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตมีความ สามารถในการละลายน้ำได้น้อย ดังนั้นจึงใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟตในการศึกษาครั้งนี้

2.1.5.1 กลไกลการทำลายของโซเดียมซัลเฟต (Mechanisms of Sodium Sulfate Attacks) [10]

กลไกลการทำลายของโซเดียมซัลเฟตดังสมการที่ 2.13 ถึง 2.16 เริ่มต้น เมื่อโซเดียม ซัลเฟตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, CH) ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ดังสมการที่ 2.10 เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่มีความเป็นด่างสูงมาก

(pH=13.5) จึงเป็นการรักษาสภาพทั้งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($C\underline{S}H_2$) ที่ได้จากสมการที่ 2.10 จะทำปฏิกิริยา กับผลผลิตไฮเดรชั่นบางตัว เช่น แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C_4AH_{13}) โมโนซัลเฟต ($C_4A\underline{S}H_{12}$) และไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทำให้ได้ Secondary Ettringite ดังสมการที่ 2.2 ถึง 2.4 โดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลิตผลปฏิกิริยาไฮเดรชั่นชนิดอื่นมาก จึงทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นการทำลายโซเดียมซัลเฟต จึงเป็นการขยายตัวและแตกร้าวของคอนกรีต

$$CH + N\underline{S} + 2H \longrightarrow C\underline{S}H_2 + NH \quad (2.13)$$

$$C_4AH_{13} + 3C\underline{S}H_2 + 14H \longrightarrow C_6AH_{32} + CH \quad (2.14)$$

$$C_4A\underline{S}H_{12} + 2C\underline{S}H_2 + 16H \longrightarrow C_6A\underline{S}H_{32} \quad (2.15)$$

$$C_3A + 3C\underline{S}H_2 + 26H \longrightarrow C_6A\underline{S}H_{32} \quad (2.16)$$

โดยที่ $C = CaO$, $N = Na_2O$, $M = MgO$, $S = SiO_2$, $S = SiO_3$, และ $H = H_2O$

2.1.5.2 กลไกลการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟต (Mechanisms of Magnesium Sulfate Attacks) [10]

กลไกลการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.17 ถึง 2.19 จะแตกต่างจากกรณีของโซเดียมซัลเฟต กล่าวคือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MH) หรือ Brucite มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก และค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่าประมาณ 10.5 ซึ่งมีค่าความเป็นด่างสูง ดังนั้นจึงทำให้ทั้ง C-S-H และ Ettringite ไม่เสถียรภาพ นอกจากนี้ C-S-H จะถูกทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตดังแสดงในสมการที่ 2.15 จากสมการที่ 2.14 และ 2.15 ทั้ง $C\underline{S}H_2$ จะถูกสะสมในช่องว่าง (Pores) ของคอนกรีต ส่วน MH จะทำปฏิกิริยากับซิลิก้าเจล (S_2H) ดังแสดงในสมการที่ 2.16 ได้แมกนีเซียมซิลิก้าไฮเดรต (M-S-H) ซึ่งไม่มีความสามารถในการยึดประสานเลย ดังนั้นการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตจึงเป็นการเปลี่ยน C-S-H ให้เป็น M-S-H การทำลายดังกล่าวทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อม สภาพของซีเมนต์ที่แข็งตัว และจะเกิดสะสม $C\underline{S}H_2$ โดยไม่เกิดการขยายตัวมาก ดังกรณีการทำลายของโซเดียมซัลเฟต

$$CH + M\underline{S} + 2H \longrightarrow C\underline{S}H_2 + MH \quad (2.17)$$

$$C_XS_YH_Z + xM\underline{S} + (3x+0.5y-z)H \longrightarrow xC\underline{S}H_2 + xMH + 0.5yS_2H \quad (2.18)$$

$$4MH + \underline{S}H_n \longrightarrow M_4\underline{S}H_{8.5} + (n-4.5)\,H \quad (2.19)$$

2.1.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายซัลเฟต

1. สิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟตลอดจนความเข้มข้นของซัลเฟต

2. ความทึบของน้ำของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตเข้าไปได้ยากลดการทำลายขั้นรุนแรง

3. ปริมาณ C_3A และ C_4AF ของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และ C_4AF น้อยมีแนวโน้มต้านทานการทำลายของซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A และ C_4AF สูง และปูนซีเมนต์ มีอัตราส่วน C_2A และ C_3S ต่ำ ก็มีความต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น

4. ปริมาณ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตถ้าลดปริมาณของ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตก็ช่วยลดความรุนแรงลงได้ด้วยวิธีการลด $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตอาจทำได้โดยใช้สารวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

2.1.5.4 วิธีการป้องกันการทำลายโดยซัลเฟต

1. ใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และอัตราส่วนของ C_2A และ C_3S ต่ำ นั่นคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 หรือเรียกว่าปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟต (Sulfate Resisting Cement)

2. การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ซึ่งช่วยลดปริมาณบางส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ รวมทั้งลด C_3A และยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีตได้ด้วย

3. ลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้ต่ำเพื่อให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้น

4. ออกแบบให้คอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์เพสต์ไม่เกินไป

ในบางกรณี การป้องกันความเสียหายจากการทำลายของซัลเฟต ที่รุนแรงโดยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แต่เพียงอย่างเดียวอาจไม่พอในสภาวะที่ซัลเฟตเข้มข้นอยู่ในระดับรุนแรงมาก หากใช้ปอซโซลานประกอบด้วยก็จะทำให้คอนกรีตมีความสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดียิ่งขึ้นจากตารางที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงข้อแนะนำของสมาคมคอนกรีตในสหรัฐอเมริกา [11] สำหรับการเลือกใช้วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีต ในสภาวะที่มีซัลเฟตอยู่ในระดับรุนแรงต่างๆ กัน

ตารางที่ 2.9 ข้อแนะนำสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติในสภาวะแวดล้อมของซัลเฟต

สภาพแวดล้อมซัลเฟต	ซัลเฟตในดินที่ละลายน้ำ (SO_4^{2-} ร้อยละ)	ซัลเฟต (PPM)	ประเภทของวัสดุประสาน	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/C ratio)
เบาบาง	0.00 - 0.10	0 - 150	-	-
ปานกลาง	0.10 - 0.20	150 - 1500	ประเภท 2, ประเภท 1 +สารปอซโซลาน	ไม่สูงเกิน 0.50
รุนแรง	0.20 - 2.00	1500 - 10000	ประเภท 5	ไม่สูงเกิน 0.45
รุนแรงมาก	มากกว่า 2.00	มากกว่า 10000	ประเภท 5 + สารปอซโซลาน	ไม่สูงเกิน 0.45

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นการศึกษางานวิจัยที่ผ่านการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยและผงหินปูนมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ เพื่อต้านทานสารละลายซัลเฟต

Al-Amoudi at el., (1995) [12] พบว่า ปูนซีเมนต์ที่ผสมด้วยร้อยละ 25 ของเถ้าลอย หรือร้อยละ 10 ของซิลิกาฟูม หรือร้อยละ 70 ของตะกรันเตาถลุงเหล็กจะมีความต้านทานโซเดียมซัลเฟตได้ดีมาก แต่จะต้านทานซัลเฟตได้แย่ลงเมื่อเป็นกรณีของแมกนีเซียมซัลเฟต

Al-Amoudi, (1999) [10] รายงานกลไกการทำลายของซัลเฟตในปูนซีเมนต์ผสม โดยเฉพาะเมื่อผสมด้วยซิลิกาฟูม พบว่าสามารถต้านทานโซเดียมซัลเฟตได้ดีมาก เนื่องจากสามารถไปลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และยังช่วยเป็นตัวที่ไปแทรกในช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ทำให้ เกิดความแน่นมากขึ้นจึงช่วยต้านทานซัลเฟตได้เป็นอย่างดี แต่ในกรณีของแมกนีเซียมซัลเฟตกลับพบว่าเมื่อใช้ซิลิกาฟูมหรือตะกรันเตสถลุงเหล็กแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ มีผลทำให้การต้านทานซัลเฟตที่แย่ลง เพราะแม้ว่าจะไปลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ก็ตาม แต่กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตจะไปเปลี่ยน CSH ให้เป็น MSH ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสานจึงทำให้มีการลดค่ากำลังอัดของคอนกรีตลง

S.U. Al-Dulaijan, (2003) [13] ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต โดยปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 นอกจากนี้ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมซิลิกาฟูม จากการศึกษาพบว่าการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมซิลิก้าฟูมในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีความสามารถใกล้เคียงกัน สามารถใช้ทดแทนกันได้ทั้งในสภาพแวดล้อมซัลเฟต

Pitisan Krammart and Somnuk Tangtermsirikul, (2004) [14] ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แตกต่างกันสองระดับคือร้อยละ 8.28 และร้อยละ 17.28 จากการศึกษาพบว่าการขยายตัวเมื่อแช่ทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต รวมทั้งการลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนัก เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 ให้ค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียม ซัลเฟตจะให้ค่าสูงกว่า ในทางกลับกันมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 ส่งผลให้การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักแย่ลงกว่าเดิม แต่จะช่วยให้ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตทั้งสองชนิดลดลง การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 จะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น การใช้เถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่การลดลงจะไม่มีผลกระทบเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 นอกจากนี้ยังพบว่าในสารละลายโซเดียม ซัลเฟต ค่าการขยายตัว ค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัด และค่าการสูญเสียน้ำหนักจะเป็นสัดส่วนกัน อย่างไรก็ตามในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีเพียงค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนักที่เป็นสัดส่วนกัน แต่การขยายตัวจะมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับค่าการลดลงของกำลังรับแรง อัดและค่าการสูญเสียน้ำหนัก

ณัฐวรรธน์และคณะ, (2548) [15] ได้ศึกษาการนำเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนมาแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 20, 25, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก โดยศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของตัวอย่างมอร์ต้าร์เปรียบเทียบกับตัวอย่างมอร์ต้าร์มาตรฐานซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 และอัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 โดยน้ำหนักพบว่าปริมาณน้ำเหมาะสมที่ใช้จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ของผงหินปูนมากขึ้น และจะลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยมากขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ของผงหินปูนมากขึ้น แต่ยังน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยที่มากขึ้น การไหลจะลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ของผงหินปูนมากขึ้นและเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยมากขึ้น และเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับผงหินปูนรวมกันปริมาณน้ำที่เหมาะสม ระยะเวลาการก่อตัวและการไหลของตัวมอร์ต้าร์จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างเถ้าลอยกับผงหินปูน กรณีกำลังอัดพบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ด้วยผงหินปูนที่มีความละเอียด 3 ไมโครเมตรนั้น ตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยร้อยละ 5 ที่อายุช่วงแรกมีค่าสูงกว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์มาตรฐาน แต่เมื่ออายุมากขึ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์มาตรฐานจะมีกำลังอัดที่สูงกว่า แต่เมื่อแทนที่

ร้อยละ 10 จะให้ค่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ต่ำกว่ามาตรฐาน ส่วนการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนที่มีความละเอียด 13 ไมโครเมตร และการแทนที่ด้วยเถ้าลอยรวมถึงการแทนที่ทั้งฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ในทุกอัตราส่วนกำลังอัดตัวอย่างมอร์ต้าร์จะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน

ชรรณสิทธิ์และคณะ, (2549) [16] ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูนผสมเถ้าลอยโดยใช้มอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ทั้งไม่แทนที่และแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนกับเถ้าลอย และทั้งฝุ่นหินปูนที่ผสมเถ้าลอย ซึ่งในการศึกษาใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ตลอดการทดลอง โดยทำการวัดการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟต ทั้งโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 2, 3, 4, 8, 13, 20, 28, 36, 44 และ 52 สัปดาห์ พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในขณะที่การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ เถ้าลอยผสมผงหินปูนที่แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้งกรณีประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน อย่างไรก็ตาม พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยผสมผงหินปูน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่ากรณีของตัวอย่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยผสมผงหินปูน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ปิติศานต์ กร้ำมาตร และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล, (2550) [17] ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ ที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยบางส่วน โดยการวัดการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักตัวอย่างถูกแช่ในสารละลายซัลเฟต จากการศึกษาพบว่าทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตการขยายตัวของมอร์ต้าร์แทนที่ฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่า เมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 68 สัปดาห์ ทุกส่วนผสมยังไม่มีการสูญเสียน้ำหนัก ในขณะที่การแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 ล้วน แต่ในกรณีมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 ล้วน

ทีฆทัศน์ และคณะ, (2550) [18] ได้ศึกษาการขยายตัวของมอร์ต้าร์ผงหินปูนและเถ้าลอยในสารละลายซัลเฟตโดยศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากสารละลายซัลเฟตตัวอย่างมอร์ต้าร์ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับผงหินปูนและเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ทำการวัดการขยายตัวที่แช่

ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 2, 3, 4, 8, 13, 20, 28, 36, 44, 52, 60 และ 68 สัปดาห์ พบว่าเมื่อผสมผงหินปูนขนาด 3 ไมโครเมตร ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 5 จะมีค่าการขยายตัวใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน แต่จะน้อยกว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อใช้ในอัตราส่วนร้อยละ 10 จะมีค่าการขยายตัวมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน กรณีแทนที่ด้วยผงหินปูนขนาด 13 ไมโครเมตร ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และร้อยละ 10 จะมีค่าการขยายตัวมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วนและในกรณีที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 20 และร้อยละ 40 พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์น้อยกว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน

ขวัญตาและคณะ, (2553) [19] ได้ศึกษาการขยายตัวของมอร์ต้าร์ผงหินปูนในสารละลายซัลเฟต โดยแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 นำมาแทนที่ด้วยผงหินปูนความละเอียด 3 ไมโครเมตร และ 15 ไมโครเมตร ในปริมาณร้อยละ 0, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ทำการแช่ตัวอย่างในสารละลายซัลเฟต แล้วทำการวัดการขยายตัวของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ในช่วงอายุ 560 วัน จะพบว่าในสารละลายซัลเฟตการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการแทนที่ด้วยผงหินปูนทุกอัตราส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 จะทำให้การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยมีค่ามากกว่าหรือใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และเมื่อใช้ผงหินปูนความละเอียด 3 ไมโครเมตร แทนที่ในตัวอย่างมอร์ต้าร์ทุกอัตราการแทนที่ ทำให้การขยายตัวมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยผงหินปูนความละเอียด 15 ไมโครเมตร ส่วนเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง ตัวอย่างมอร์ต้าร์ในทุกอัตราการแทนที่มีค่าการขยายตัวมากกว่า กรณีที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะมีค่ามากกว่าในกรณีสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

พิพัฒน์และคณะ, (2554) [20] ได้ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นและการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ซึ่งได้ศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ การไหลแผ่ กำลังอัดประลัยและความพรุนของมอร์ต้าร์ และการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในสารละลายโซเดียมซัลเฟต โดยพบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ที่แทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่ามากกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ยกเว้นเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนความละเอียด 4 ไมโครเมตร ร้อยละ 5 มีแนวโน้มที่น้อยกว่า ขณะที่เพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยและเพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนให้ค่าที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน สำหรับการก่อตัวของเพสต์ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน เถ้าลอย และเถ้าลอย

บทที่ 3
วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาจะกล่าวถึงวัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา รายละเอียดวิธีการศึกษา และสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

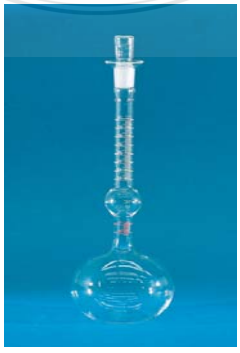
3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย ผงหินปูน ทรายแม่น้ำ สารโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 80-2517 โดยเป็นปูนซีเมนต์ที่ใหม่ไม่จับตัวเป็นก้อน
2. เถ้าลอย จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
3. ผงหินปูน ใช้ผงหินปูนที่ได้รับการควบคุมคุณภาพในการผลิต มีสิ่งเจือปนน้อย และผลิตเพื่อจำหน่ายเป็นอุตสาหกรรม โดยมีความละเอียด 2 ไมโครเมตร
4. ทราย ใช้ทรายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่างๆ ออกจนสะอาด นำไปอบและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และปรับทรายให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง
5. สารโซเดียมซัลเฟต ($NaSO_4$)
6. สารแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$)
7. น้ำสะอาด

3.1.2 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในศึกษา

1. ขวดมาตรฐานเลอชาเตอร์ลิเยร์ (ภาพที่ 3.1)



ภาพที่ 3.1 ขวดมาตรฐานเลอชาเตอร์ลิเยร์ (Le Chatelier Flask)

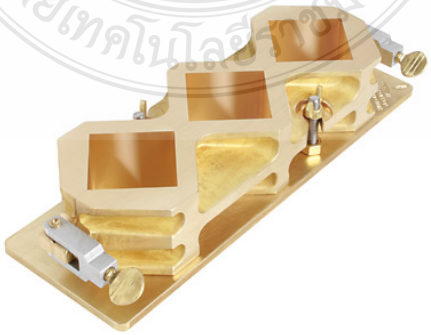
2. เครื่องมือแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์ (ภาพที่ 3.2)

ภาพที่ 3.2 เครื่องมือแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์ (Air Permeability Apparatus)

3. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล

ภาพที่ 3.3 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม

4. แบบหล่อตัวอย่างขนาด 50×50×50 มม.



ภาพที่ 3.4 แบบหล่อตัวอย่างขนาด 50×50×50 มม.

5. แบบหล่อตัวอย่างขนาด 25×25×285 มม.

ภาพที่ 3.5 แบบหล่อตัวอย่างขนาด 25×25×285 มม.

6. เครื่องวัดความยาว (ภาพที่ 3.6)

ภาพที่ 3.6 เครื่องวัดความยาว (Length Comparator)

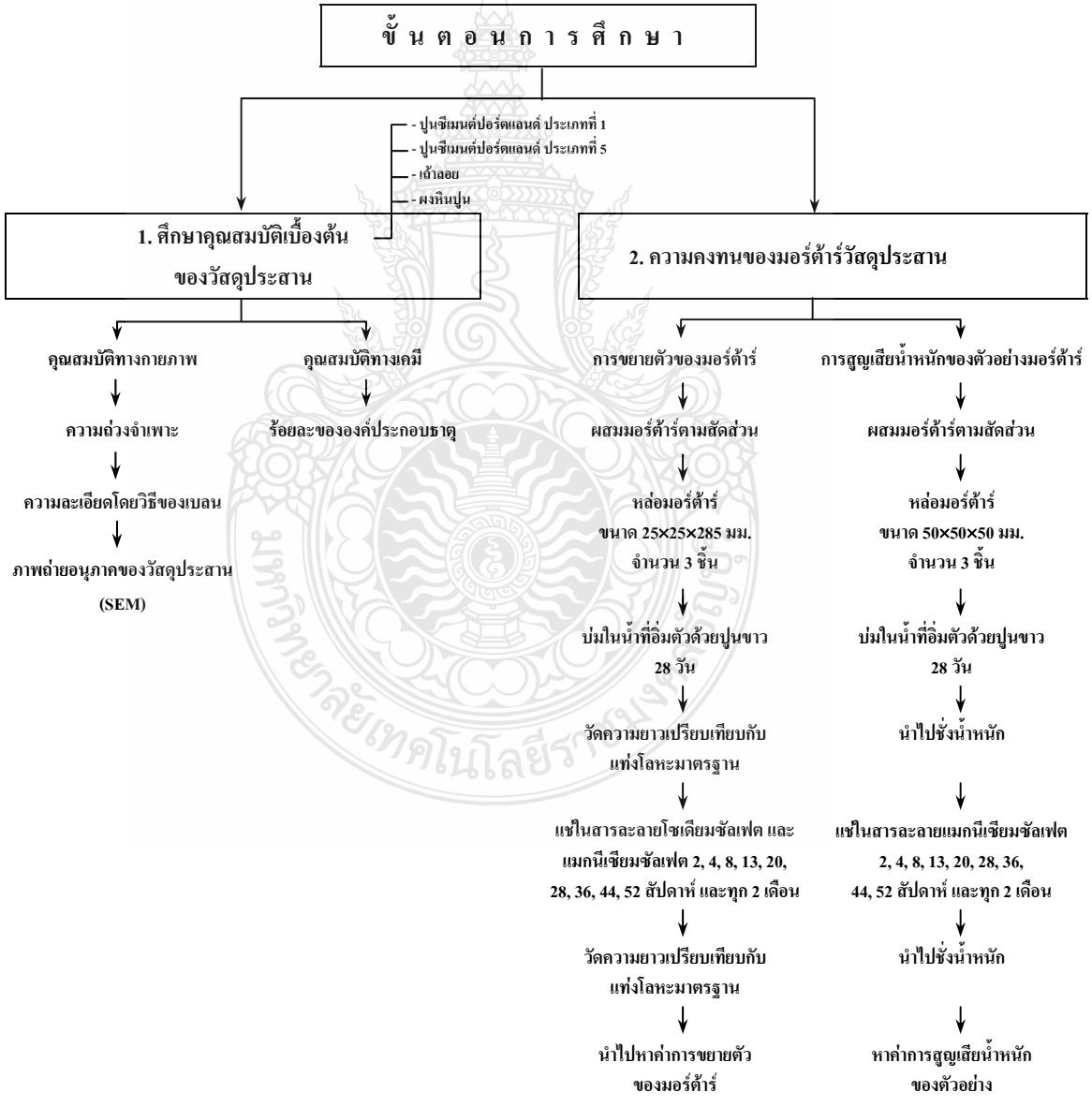
7. เครื่องผสมมอร์ต้าร์ (ภาพที่ 3.7)

ภาพที่ 3.7 เครื่องผสมมอร์ต้าร์

3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับรายละเอียดวิธีการศึกษา ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน ศึกษาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลของการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังกล่าวโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตที่แตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 ขั้นตอนการศึกษา โดยภาพรวมของขั้นตอนการศึกษาแสดงดังภาพที่ 3.8 และรายละเอียดวิธีการทดลองอยู่ในหัวข้อ 3.2.2 ถึง 3.2.5



ภาพที่ 3.8 ภาพรวมของขั้นตอนการศึกษา

3.2.2 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน

1. ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน ตามมาตรฐาน ASTM C188
2. ความละเอียดของวัสดุโดยใช้วิธีของเบลน (Blaine Fineness) ตามมาตรฐาน ASTM C204
3. ถ่ายภาพอนุภาคของวัสดุประสาน โดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope (SEM)
4. องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน โดยใช้เครื่อง X -Ray Fluorescence

3.2.3 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 1012-97 ด้วยเครื่องวัดความยาว (Length Comparator) (ภาพที่ 3.6) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การเตรียมตัวอย่าง

การทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ใช้ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ ซึ่งเตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 25×25×285 มม. ดังภาพที่ 3.5 ในแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ใช้ชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 3 ชิ้น

2. อายุการบ่มและอายุทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์

หลังจากหล่อชิ้นตัวอย่างแล้ว ทำการถอดแบบที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์ 24 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ไปบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (Saturated Lime Water) เป็นเวลา 28 วัน อุณหภูมิในระหว่างการบ่มเท่ากับ 30±2°C หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ ทั้ง 6 ชิ้น ในแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์จะถูกนำขึ้นจากน้ำแล้วเช็ดผิวให้แห้งด้วยผ้า หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์วัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานดังภาพที่ 3.8 ซึ่งค่าที่วัดได้ ณ ขณะนี้จะใช้เป็นค่าความยาวเริ่มต้น เมื่อวัดค่าความยาวเสร็จชิ้นตัวอย่างทั้ง 6 ชิ้น จะถูกนำไปแช่ในสารละลายซัลเฟต โดยแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 3 ชิ้น และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 3 ชิ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ยการขยายตัวของมอร์ต้าร์ ที่อายุแช่ในสารละลายครบ 2, 4, 8, 13, 16 สัปดาห์ และทุกๆ 2 เดือน ของการแช่ในสารละลายซัลเฟต ตามลำดับ

3. การหาค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต

เมื่อครบที่อายุแช่ในสารละลาย (2, 4, 8, 13, 16 สัปดาห์ และทุกๆ 2 เดือน ของการแช่ในสารละลายซัลเฟต) นำชิ้นตัวอย่างทั้ง 3 ชิ้น ขึ้นจากสารละลายซัลเฟตเช็ดผิวให้แห้งด้วยผ้า หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน ซึ่งค่าที่วัดได้นำไปหาค่าการขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟต โดยสามารถหาค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ได้จากสมการที่ 3.1

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100 \qquad (3.1)$$

โดย ΔL คือ ค่าการขยายตัว (%)

L_x คือ ค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน หลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตที่อายุแช่ในสารละลายซัลเฟตต่างๆ (มม.)

L_i คือ ค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้น (มม.)

L_g คือ ค่าความยาวของ Gauge Length หรือเท่ากับ 285 มม.

3.2.4 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ทำการทดสอบด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม (ภาพที่ 3.3) โดยการหาการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์มีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

1. การเตรียมตัวอย่าง

การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ใช้ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ ซึ่งเตรียมโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 50×50×50 มม. ดังภาพที่ 3.4 ในแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ใช้ชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 3 ชิ้น

2. อายุการบ่มและอายุทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์

หลังจากหล่อชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์แล้ว ทำการถอดแบบที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (Saturated Lime Water) เป็นเวลา 28 วัน อุณหภูมิในระหว่างการบ่มเท่ากับ 30±2°C หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว แล้วนำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้ง 3 ชิ้น ของแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ขึ้นจากน้ำ แล้วล้างทำความสะอาดเอาปูนขาวและสิ่งสกปรกที่อาจติดอยู่ที่ผิวของชิ้นตัวอย่างออกแล้วเช็ดผิวชิ้นตัวอย่างด้วยผ้า

เมื่อชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง นำชิ้นตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก ซึ่งน้ำหนักที่ชั่งได้ ณ ขณะนี้จะใช้เป็นน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างมอร์ต้าร์ หลังจากชั่งน้ำหนักเสร็จแล้ว นำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เพื่อหาค่าเฉลี่ยการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อายุแช่ในสารละลายครบ 2, 4, 8, 13, 16 สัปดาห์ และทุกๆ 2 เดือน ของการแช่ในสารละลายซัลเฟต ตามลำดับ ซึ่งในกรณีการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์จะประเมินเฉพาะในกรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเท่านั้น

3. การหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

เมื่อครบที่อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (2, 4, 8, 13, 16 สัปดาห์ และทุกๆ 2 เดือน ของการแช่ในสารละลายซัลเฟต) นำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้ง 3 ชิ้น ของแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ขึ้นจากสารละลายซัลเฟต หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์มาปัดผิวด้วยแปรง เพื่อให้เศษมอร์ต้าร์ที่อาจเสื่อมสภาพเนื่องจากการทำลายโดยสารละลายซัลเฟตหลุดออก และซับผิวให้แห้งด้วยผ้า เมื่อชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง นำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อนำค่าไปหาการ

สูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ เนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยสามารถหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ได้จากสมการที่ 3.2

$$\Delta W = \frac{W_i - W_x}{W_i} \times 100 \qquad (3.2)$$

โดย ΔW คือ ค่าการสูญเสียน้ำหนัก(%)

W_x คือ ค่าน้ำหนักที่อายุต่างๆที่แช่ในสารละลายซัลเฟต (กรัม)

W_i คือ ค่าน้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)

สำหรับขั้นตอนการเปรียบเทียบผลของการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์โดยการเปรียบเทียบผลของการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ระหว่างตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างกัน ต่อจากนั้นเป็นการวิเคราะห์สรุปผลการทดลอง เพื่อเลือกความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตที่เหมาะสมในการแช่ตัวอย่างและส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

3.2.5 การเตรียมสารละลายซัลเฟต

ในที่นี้ใช้สารละลายซัลเฟต ซึ่งมีวิธีการเตรียมสารละลายซัลเฟต ดังนี้

1. สารละลายโซเดียมซัลเฟต

ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก หรือมีปริมาณอิอออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 6760, 33800, 67600, 101400 และ135200 ppm ตามลำดับ โดยดำเนินการเตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟตดังตารางที่ 3.1 โดยเตรียมสารละลายดังกล่าวล่วงหน้า 1 วัน

ตารางที่ 3.1 การเตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ความเข้มข้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	สารละลายโซเดียมซัลเฟต (กรัม)	สารละลาย (ลิตร)	ปริมาณอิอออนซัลเฟต (ppm)
1	10	1	6,760
5	50	1	33,800
10	100	1	67,600
15	150	1	101,400
20	200	1	135,200

2. สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก หรือมีปริมาณอิออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 6760, 33800, 67600, 101400 และ135200 ppm ตามลำดับ โดยดำเนินการเตรียมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตดังตารางที่ 3.2 และทำการเตรียมสารละลายดังกล่าวล่วงหน้า 1 วัน

ตารางที่ 3.2 การเตรียมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ความเข้มข้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (กรัม)	สารละลาย (ลิตร)	ปริมาณอิออนซัลเฟต (ppm)
1	8.47	1	6,760
5	42.36	1	33,800
10	84.72	1	67,600
15	127.08	1	101,400
20	169.44	1	135,200

3.3 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษาความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ในครั้งนี้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40 และ 0.55 อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) เท่ากับ 2.75 ซึ่งรายละเอียดของสัดส่วนผสมต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ (กรัม) ที่ใช้ในการหาความต้านทานซัลเฟต

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์		เถ้าลอย	ผงหินปูน	ทราย	น้ำ
		ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5		ขนาด 2 ไมครอน		
1.	C1W55	1.00		0	0	2.75	0.55
2.	C5W55		1.00	0	0	2.75	0.55
3.	C1W55FA20	0.80		0.20	0	2.75	0.55
4.	C1W55FA40	0.60		0.40	0	2.75	0.55
5.	C5W55FA20		0.80	0.20	0	2.75	0.55
6.	C5W55FA40		0.60	0.40	0	2.75	0.55
7.	C1W55LP10	0.90		0	0.10	2.75	0.55
8.	C5W55LP10		0.90	0	0.10	2.75	0.55
9.	C1W55FA10LP10	0.80		0.10	0.10	2.75	0.55
10.	C1W55FA30LP10	0.60		0.30	0.10	2.75	0.55
11.	C5W55FA10LP10		0.80	0.10	0.10	2.75	0.55
12.	C5W55FA30LP10		0.60	0.30	0.10	2.75	0.55
13.	C1W40	1.00		0	0	2.75	0.40
14.	C5W40		1.00	0	0	2.75	0.40
15.	C1W40FA20	0.80		0.20	0	2.75	0.40
16.	C1W40FA40	0.60		0.40	0	2.75	0.40
17.	C5W40FA20		0.80	0.20	0	2.75	0.40
18.	C5W40FA40		0.60	0.40	0	2.75	0.40
19.	C1W40LP10	0.90		0	0.10	2.75	0.40
20.	C5W40LP10		0.90	0	0.10	2.75	0.40
21.	C1W40FA10LP10	0.80		0.10	0.10	2.75	0.40
22.	C1W40FA30LP10	0.60		0.30	0.10	2.75	0.40
23.	C5W40FA10LP10		0.80	0.10	0.10	2.75	0.40
24.	C5W40FA30LP10		0.60	0.30	0.10	2.75	0.40

หมายเหตุ :
- C1 หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- C5 หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5
- FA หมายถึง เถ้าลอย
- LP หมายถึง ผงหินปูนขนาด 2 ไมโครเมตร
- W40 หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40
- W50 หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50
- ตัวเลข 10, 20, 30, 40 และ 50 หมายถึง ร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยหรือผงหินปูน

ร่วมกันกับผงหินปูนมีค่ามากกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์จะให้ค่าที่ผกผันกับปริมาณน้ำที่เหมาะสม ในกรณีค่ากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูน และเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีแนวโน้มให้ค่าที่มากกว่า มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน สำหรับความพรุนที่ 28 วัน ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน และเถ้าลอยผสมผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน สุดท้ายค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และการขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย ผสมผงหินปูน และผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน จะให้ค่าที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยใกล้เคียงหรือต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน กรณีเมื่อใช้เถ้าลอยในปริมาณที่ต่ำจะให้ค่าการขยายตัวที่มากกว่า

พร้อมพงศ์ ฉลาดธัญญกิจ, (2554) [21] ได้ศึกษาผลกระทบของแคลเซียมออกไซด์อิสระ (Free CaO) ในเถ้าลอยต่อการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน (แทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1) โดยใช้เถ้าลอยตั้งต้นที่เติมแคลเซียมออกไซด์อิสระให้มีปริมาณแตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่ามากกว่าประเภทที่ 5 ล้วน ขณะที่การขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูน (Limestone Power ขนาด 3 ไมโครเมตร) ร้อยละ 10 มีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และพบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอย หรือเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมอร์ต้าร์ จะมีค่าการขยายตัวมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย กล่าวคือ ถ้าเถ้าลอยมีปริมาณ CaO สูง การแทนที่ในปริมาณต่ำ อาจทำให้การขยายตัวมากขึ้น ส่วนในกรณีสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่ามากกว่าทั้งของมอร์ต้าร์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูน ขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย ร้อยละ 20 และร้อยละ 40 นั้น มีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วน ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน พบว่าทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์น้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน สำหรับปริมาณ Free CaO ที่ต่างกันในเถ้าลอย พบว่าไม่มีผลกระทบต่อค่าการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต

บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิเคราะห์

จากการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ได้พิจารณาและวิเคราะห์ผลในหัวข้อดังต่อไปนี้คือ คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน คุณสมบัติการต้านทานซัลเฟต และผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย และผงหินปูนขนาด 2 ไมโครเมตร โดยคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ คุณสมบัติทางภายภาพ และองค์ประกอบทางเคมี

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับคุณสมบัติทางด้านกายภาพของวัสดุประสานที่ศึกษา ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน (Blaine Fineness) และภาพถ่ายขยายของอนุภาค โดยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM)

1. ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีของเบลน ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

จากผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีของเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผงหินปูน และเถ้าลอย โดยมีผลการทดสอบดังตารางที่ 4.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะ 3.11 ถือว่าอยู่ในช่วงปกติ เพราะโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีความถ่วงจำเพาะ 3.18 สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เล็กน้อย ซึ่งเป็นค่าทั่วไปของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยและผงหินปูนนั้นจะมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.46 และ 2.79 ตามลำดับ และสำหรับความละเอียดโดยวิธีของเบลน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าเท่ากับ 3,250 เซนติเมตร^2/กรัม และ 3,340 เซนติเมตร^2/กรัม ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

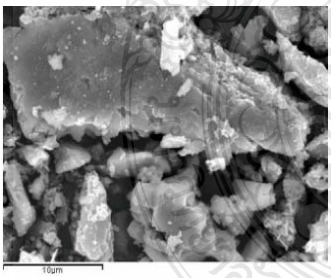
ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีของเบลนของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

รายละเอียด	ประเภทของวัสดุประสาน			
	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5	ผงหินปูน (2 ไมโครเมตร)	เถ้าลอย
ความถ่วงจำเพาะ	3.11	3.18	2.79	2.46
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ซม.^{2}/ก.)	3,250	3,340	12,160	3,550

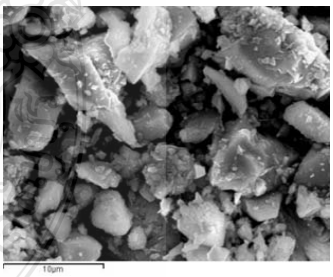
ในขณะที่ค่าความละเอียดของเถ้าลอยมีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 คือ เท่ากับ 3,550 เซนติเมตร^2/กรัม ส่วนผงหินปูนจะมีความละเอียดมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประสานชนิดอื่น คือ 12,160 เซนติเมตร^2/กรัม

2. ภาพถ่ายขยายของอนุภาคโดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope: SEM

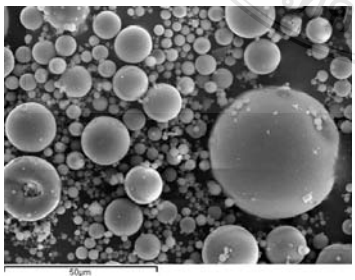
จากการถ่ายภาพขยายของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ โดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope : SEM ซึ่งขยาย 3,500 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 4.1 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีรูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมเป็นมุม ส่วนภาพขยายกำลังสูงของเถ้าลอย พบว่ามีอนุภาคทรงกลมตัน เนื้อแน่น บางส่วนมีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน มีผิวขรุขระบ้างเล็กน้อย มีขนาดต่างๆ กัน กระจายอยู่ และส่วนของผงหินปูนมีรูปร่างของอนุภาคลักษณะเป็นเหลี่ยมเป็นมุมเช่นเดียวกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และมีอนุภาคที่เล็กกว่า



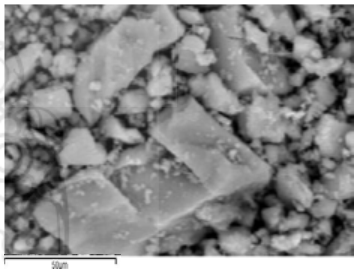
(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



(ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5



(ค) เถ้าลอย



(ง) ผงหินปูน

ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายขยาย 3,500 เท่าของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

จากการทดสอบองค์ประกอบทางเคมี โดยวิธี X-ray Fluorescence Spectrometry: XRF ในการทดสอบผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย และผงหินปูน แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า SiO_2 ของเถ้าลอยมีค่าค่อนข้างสูงคือ เท่ากับร้อยละ 39.40 เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ซึ่งเท่ากับร้อยละ 19.87 และ 21.87 ตามลำดับ ในขณะที่ของผงหินปูนมี SiO_2 น้อยมาก คือเท่ากับร้อยละ 0.46 ในกรณีของ Al_2O_3 ก็เช่นกัน โดยที่ของเถ้าลอยเท่ากับร้อยละ 17.93 ในขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 และผงหินปูน เท่ากับร้อยละ 4.87 3.87 และ 0.06 ตามลำดับ และกรณีของ Fe_2O_3 ก็ทำนองเดียวกันคือ เถ้าลอย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และผงหินปูนมีค่าเท่ากับร้อยละ 12.92 3.55 4.34 และ 0.03 ตามลำดับ ส่วนในกรณี CaO นั้น พบว่าของเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และผงหินปูน โดยเถ้าลอยมีค่าเท่ากับร้อยละ 19.19 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับร้อยละ 65.03 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าเท่ากับร้อยละ 64.56 และผงหินปูนมีค่าเท่ากับร้อยละ 55.25

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

สารประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5	เถ้าลอย	ผงหินปูน (2μ)
SiO_2	19.87	21.87	39.4	0.46
Al_2O_3	4.87	3.87	17.93	0.06
Fe_2O_3	3.55	4.34	12.92	0.03
CaO	65.03	64.56	19.19	55.25
MgO	2.52	1.11	2.99	0.37
SO_3	0.73	2.08	3.03	<0.01
Na_2O	0.02	<0.01	1.36	<0.01
K_2O	0.45	0.24	2.50	0.01
TiO_2	0.26	0.21	0.34	>0.01
P_2O_3	0.07	0.05	0.20	0.01
LOI	2.26	1.59	0.17	43.79

ในส่วนออกไซด์รองอื่นๆ ได้แก่ MgO, SO_3, Na_2O, K_2O, TiO_2 และ P_2O_3 นอกเหนือจากออกไซด์หลักที่กล่าวมาแล้ว พบว่าของปูนซีเมนต์แต่ละชนิดรวมทั้งเถ้าลอยและผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.2 ยกเว้นกรณีของการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการเผา (Loss on Ignition; LOI) ของผงหินปูนค่อนข้างสูงคือ ร้อยละ 43.79 ในกรณีที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และเถ้าลอย เท่ากับร้อยละ 2.26 1.59 และ 0.17 ตามลำดับ

4.2 คุณสมบัติการต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์

การต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในการศึกษาครั้งนี้ จะพิจารณาถึงผลกระทบของชนิดและการแทนที่ของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ชนิดของสารละลายซัลเฟต และผลกระทบจากความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟต

4.2.1 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต

จากผลของการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต ได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อการขยายตัว คือ ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และผลกระทบจากชนิดและความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต โดยใช้วัสดุประสานในการศึกษา ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย และผงหินปูน โดยเถ้าลอยใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 40 โดยน้ำหนัก ส่วนผงหินปูนจะใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก สำหรับการแทนที่เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 นั้น ได้ใช้อัตราส่วน เถ้าลอยต่อผงหินปูนดังนี้คือ เถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 เถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 โดยทุกสัดส่วนการแทนที่ใช้แทนที่โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานใช้อัตราส่วน 0. 40 และ 0. 55

4.2.1.1 ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์

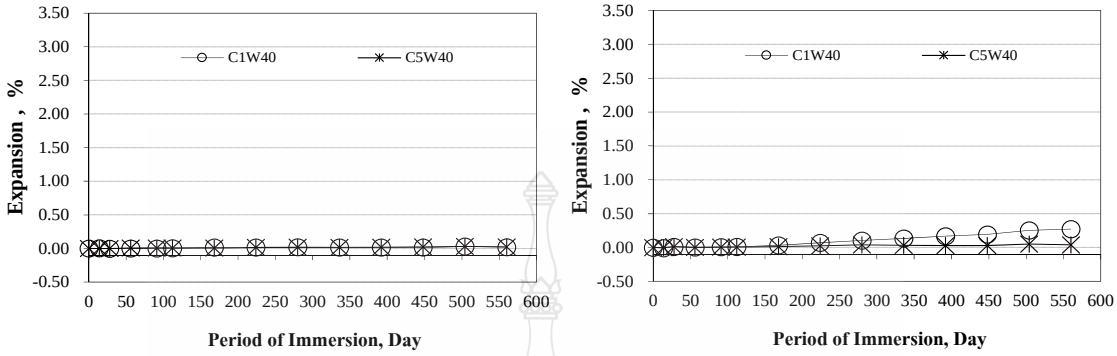
สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย และผงหินปูน (2 ไมโครเมตร)

1. กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

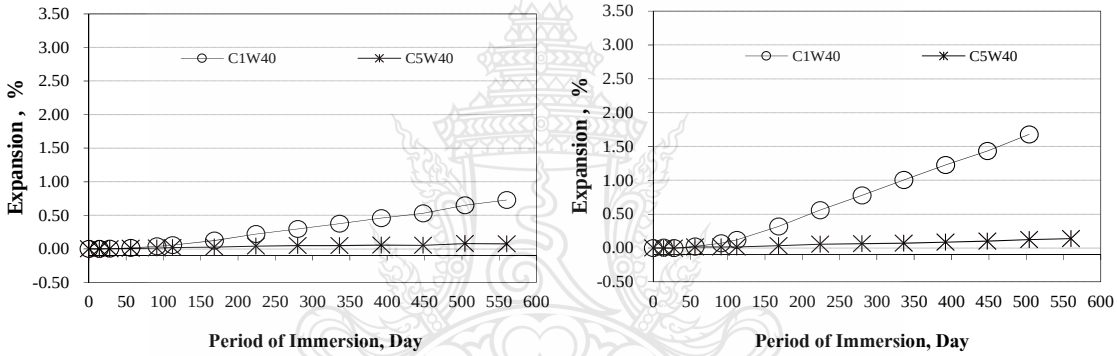
1) พิจารณาในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน

ภาพที่ 4.2 และภาพที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 และ 0.55 พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงทำให้เกิดปริมาณยิปซั่มและ Ettringite น้อยกว่า อย่างไรก็ตามในกรณีความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตร้อยละ 1 นั้นพบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน นั้นไม่เห็นความแตกต่าง เนื่องจากความเข้มข้นร้อยละ 1

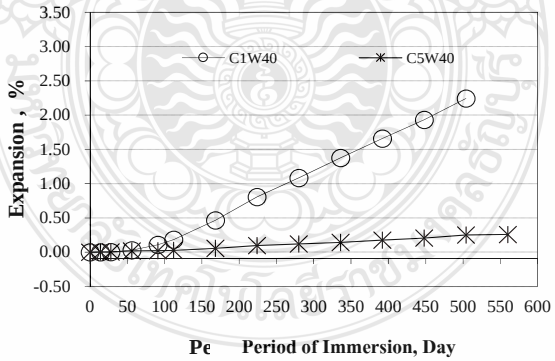
ของสารละลายซัลเฟตนั้นเป็นความเข้มข้นที่น้อยมาก จึงยังไม่เห็นความแตกต่างของการขยายตัว ทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55



(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1 (ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5

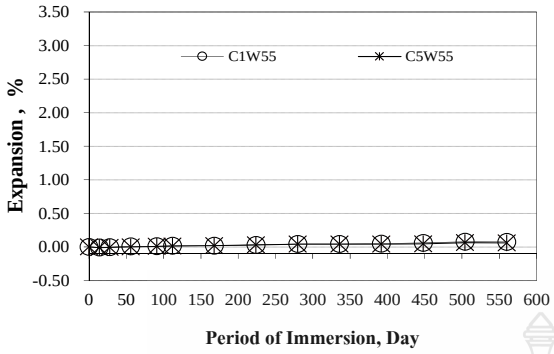


(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10 (ง) ความเข้มข้นร้อยละ 20

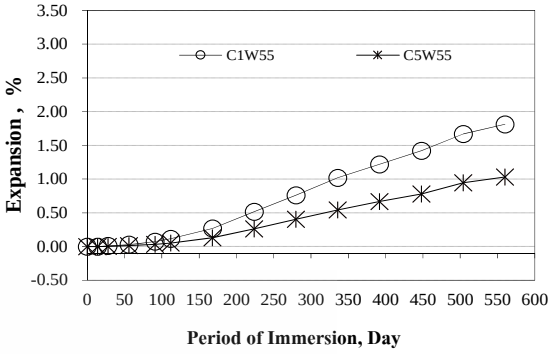


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

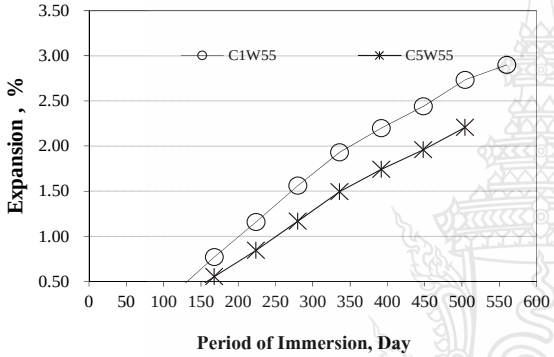
ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40



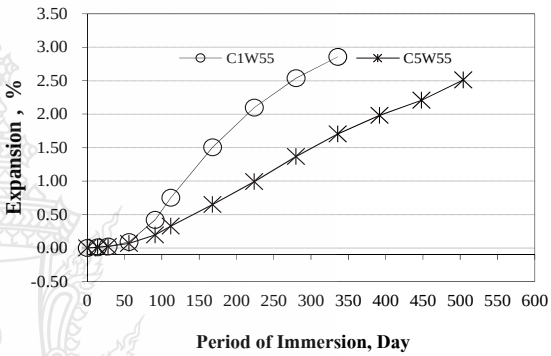
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



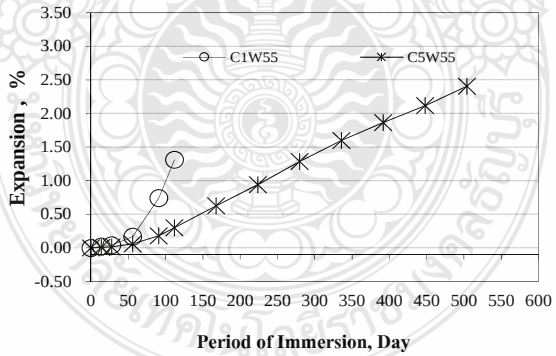
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15



(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55

2) วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

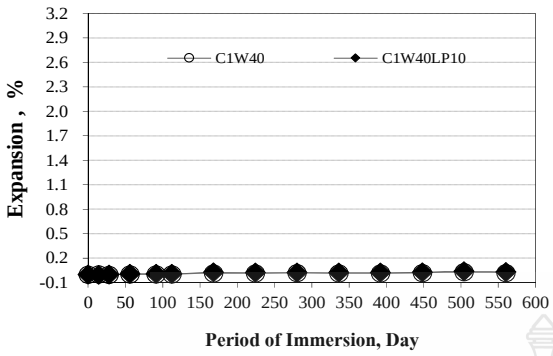
ภาพที่ 4.4 ถึงภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ภาพที่ 4.4 และภาพที่ 4.5) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูนเป็นการเติมเต็ม ทำให้มีความพรุนลดลง จึงทำให้มีที่ว่างน้อยกว่า สำหรับการขยายตัวของยิปซั่มและ Ettringite จึงเกิดการขยายตัวมากกว่า

สำหรับการแทนที่ด้วยผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ภาพที่ 4.6 และภาพที่ 4.7) พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มีแนวโน้มใกล้เคียงหรือมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน เพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูนเป็นการเติมเต็มและลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง จึงทำให้สารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ยาก รวมทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีปริมาณ C_3A น้อยด้วย จึงทำให้การขยายตัวมีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10

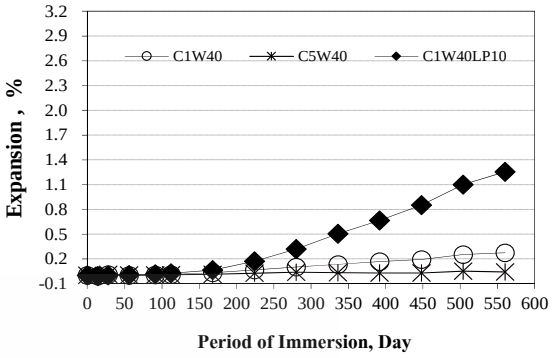
3) วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.8 ถึงภาพที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย พบว่าการยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 (ภาพที่ 4.8 และภาพที่ 4.9) มีค่าน้อยกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ รวมทั้งการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง จึงเป็นการลดปริมาณ C_3A ด้วย

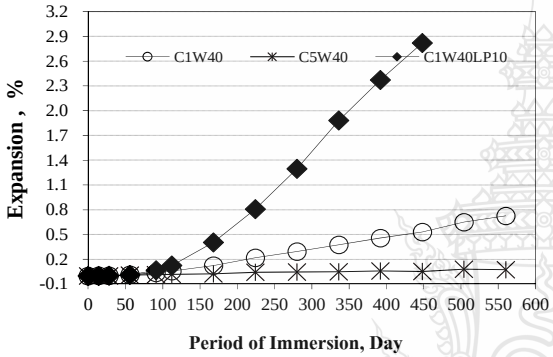
สำหรับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ภาพที่ 4.10 และภาพที่ 4.11) พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกับในการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กล่าวคือ การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยจะมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



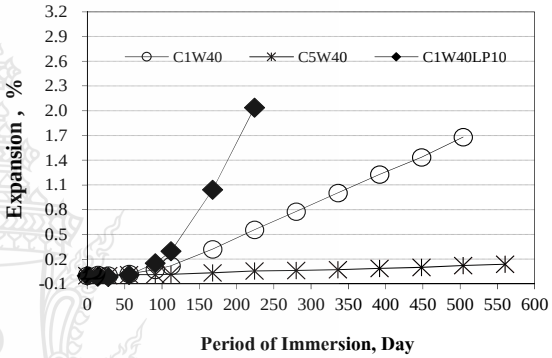
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



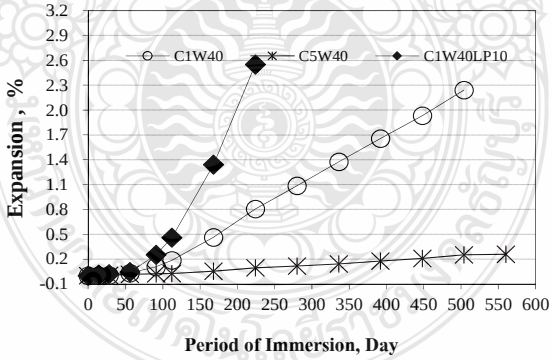
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

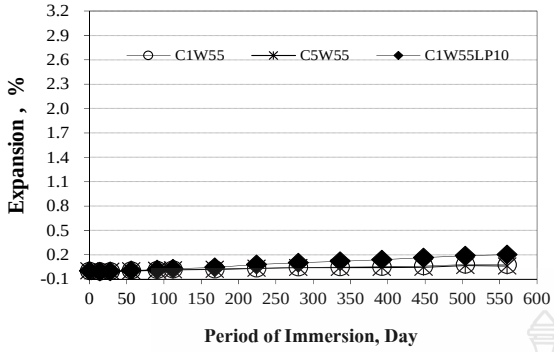


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

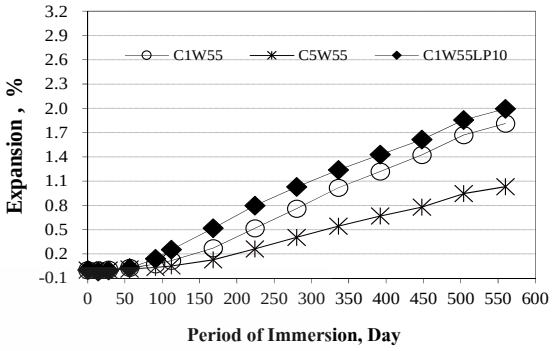


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

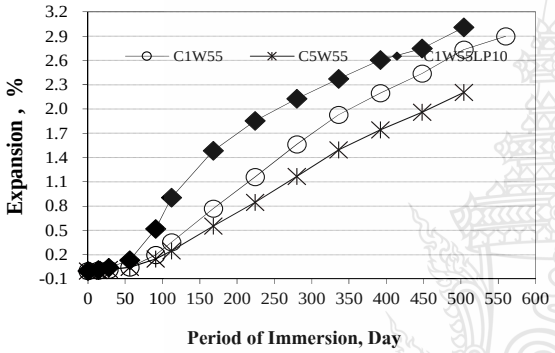
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



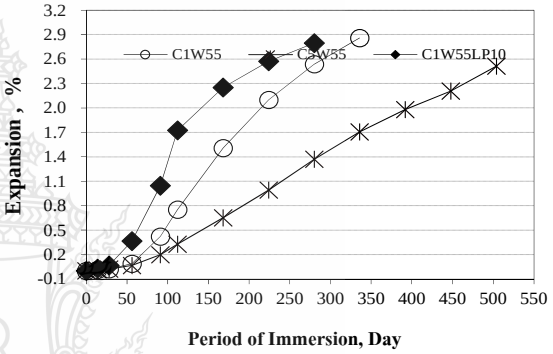
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



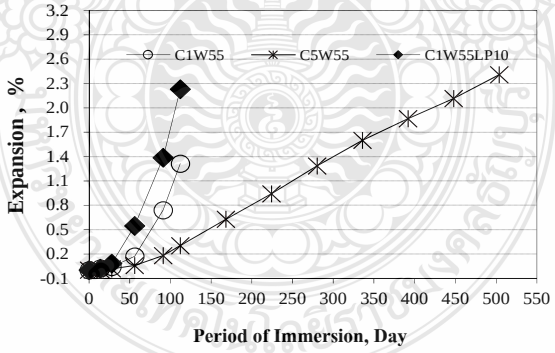
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

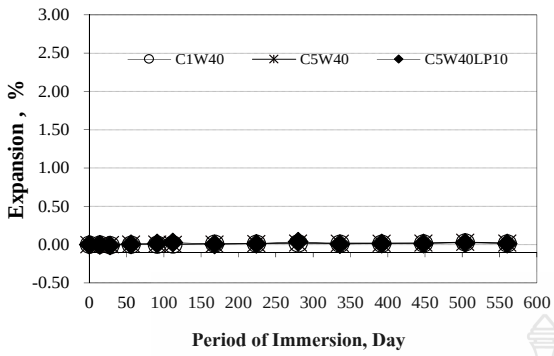


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

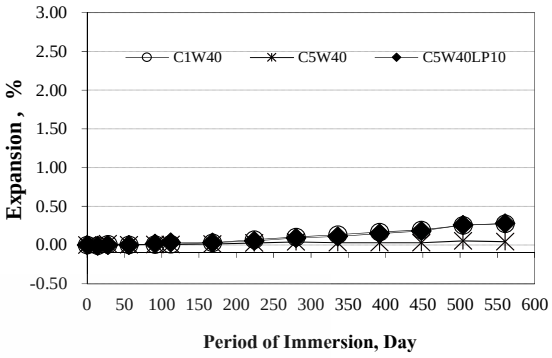


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

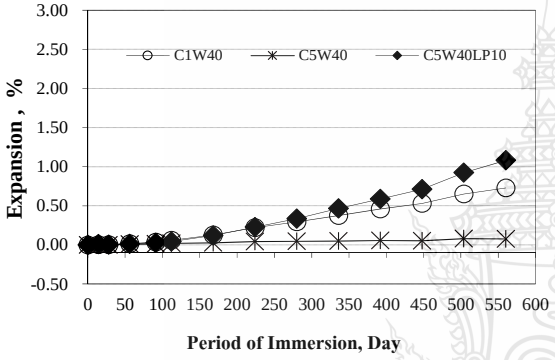
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



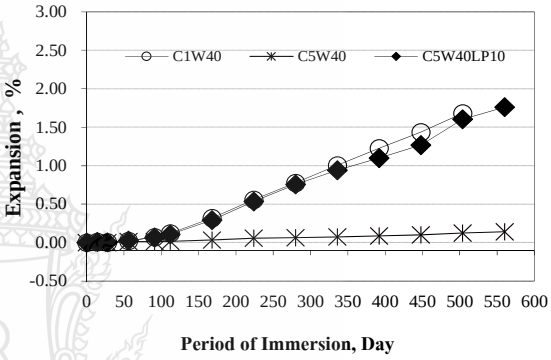
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



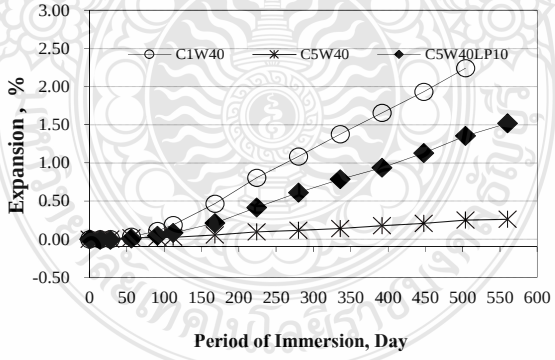
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

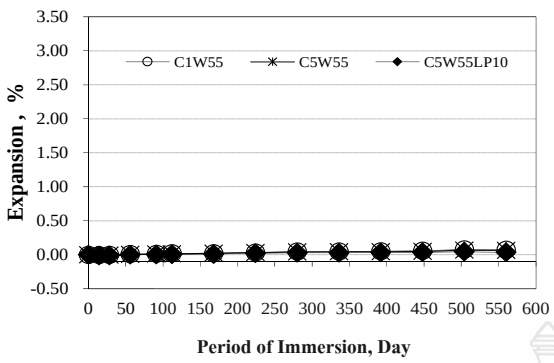


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

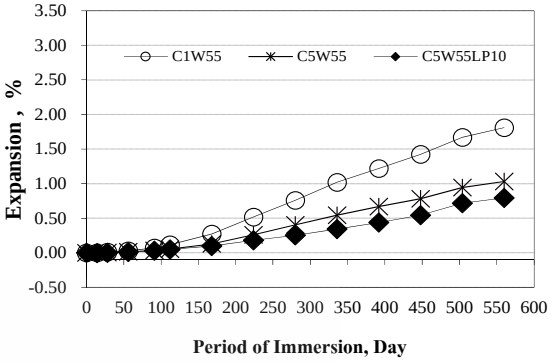


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

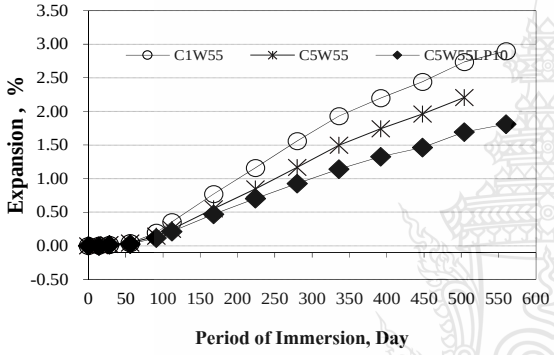
ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



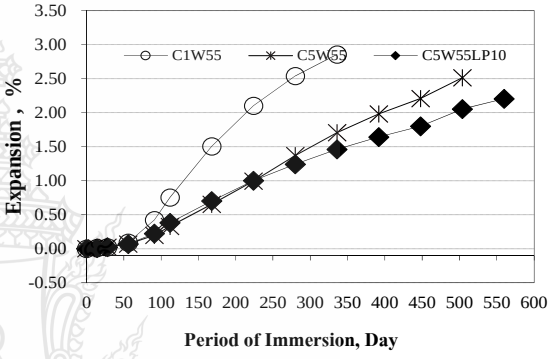
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



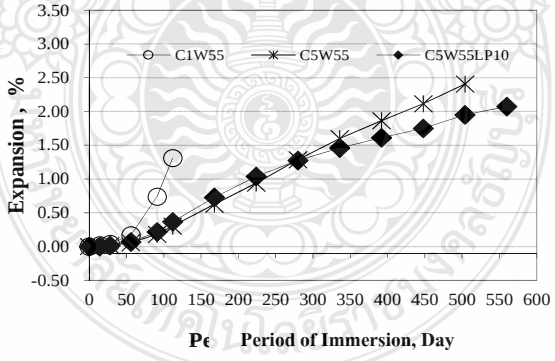
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

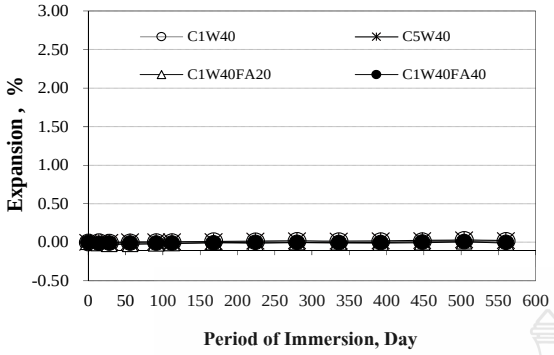


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

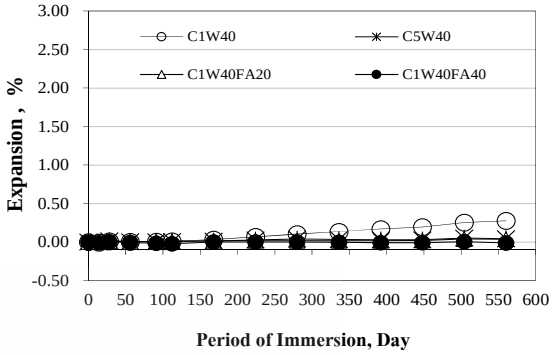


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

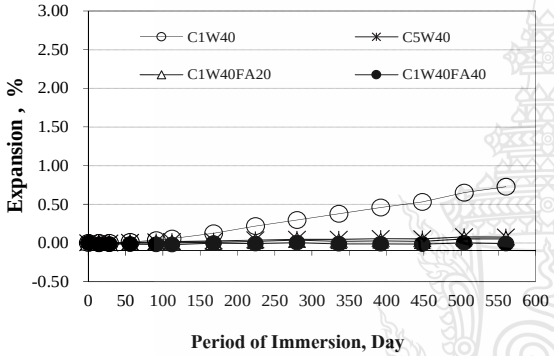
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



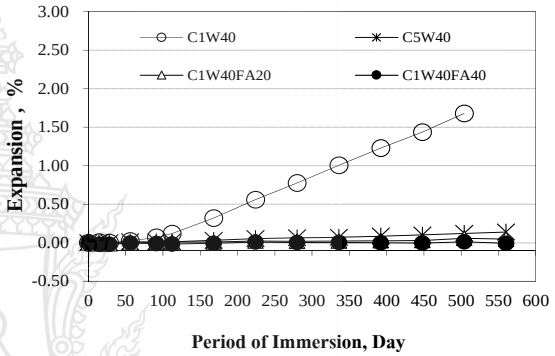
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



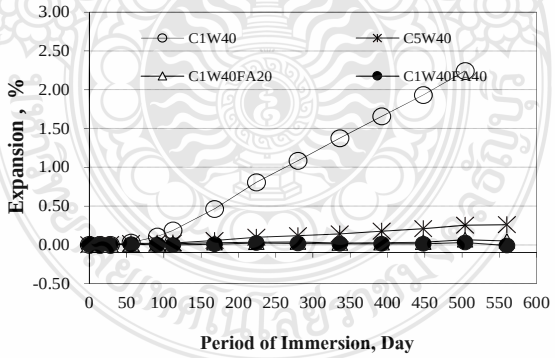
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

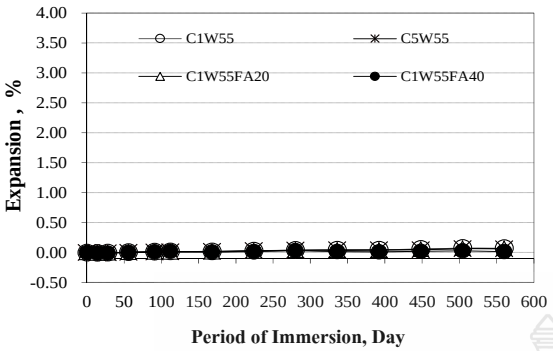


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

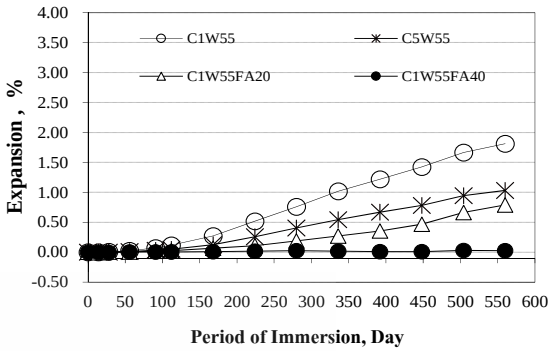


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 20

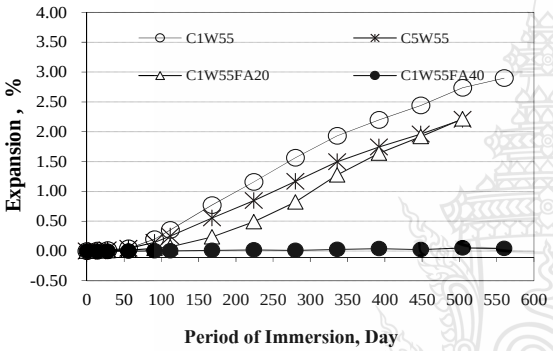
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



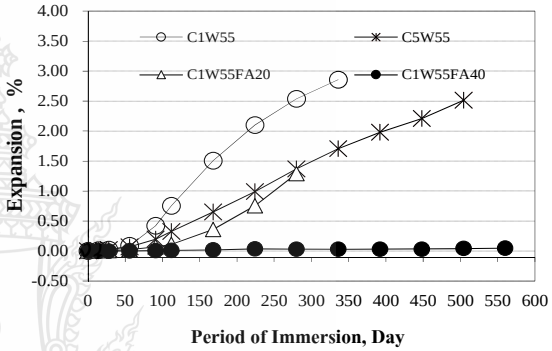
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



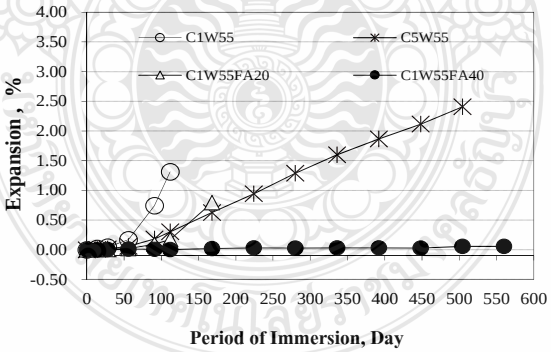
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

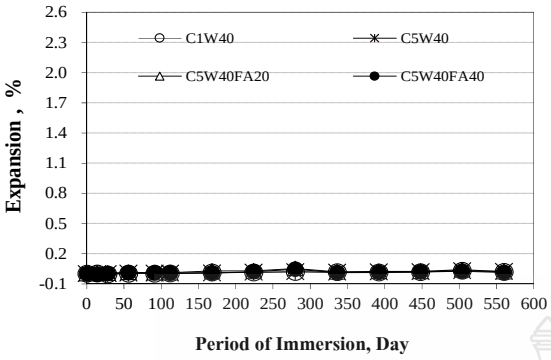


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

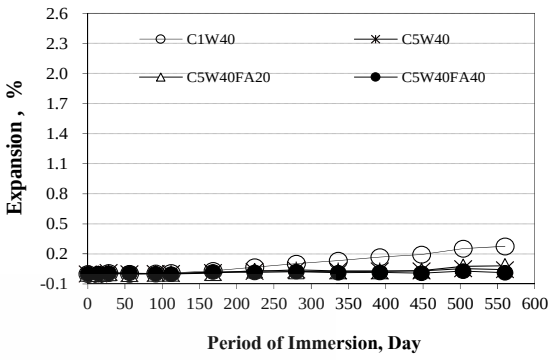


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 20

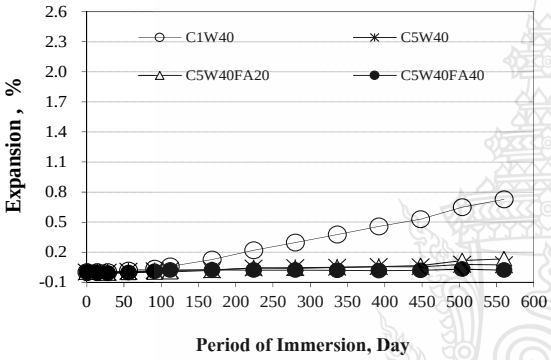
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



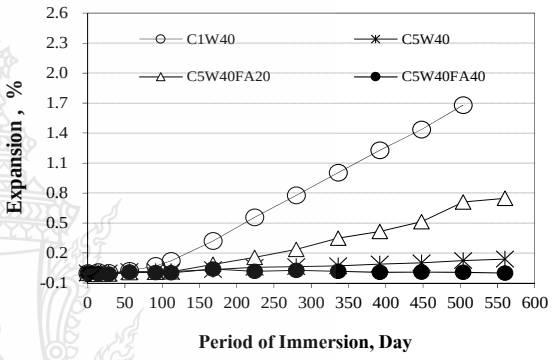
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



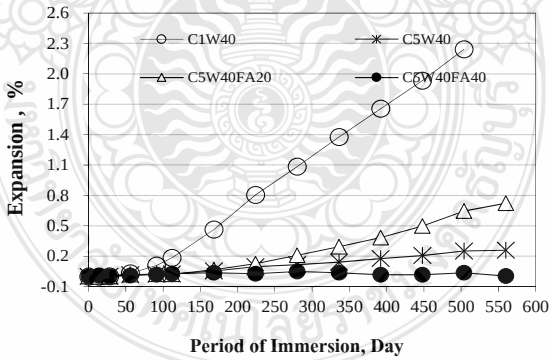
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

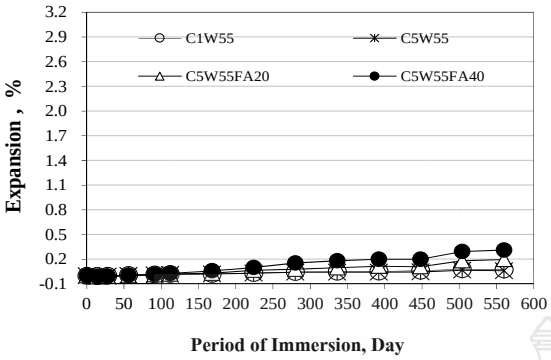


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

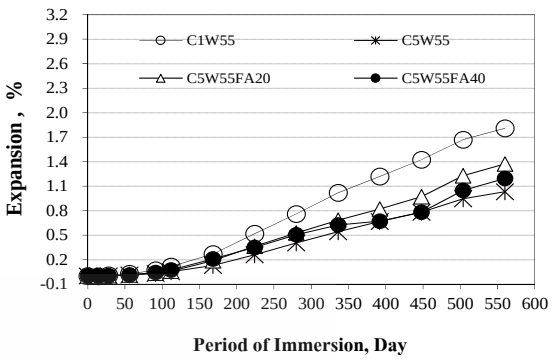


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 20

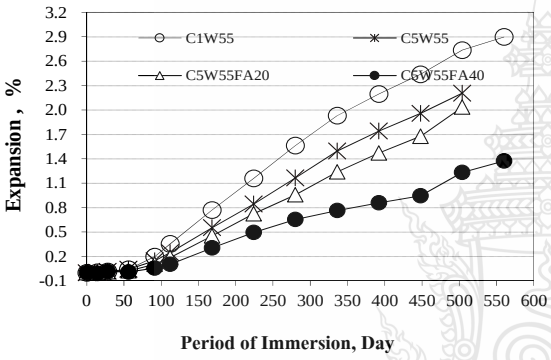
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



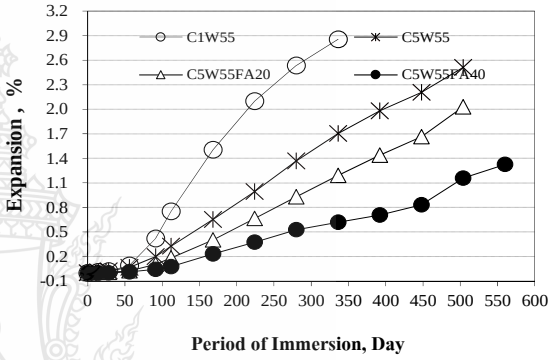
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



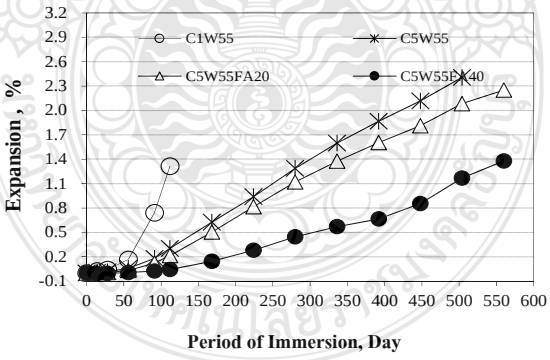
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15



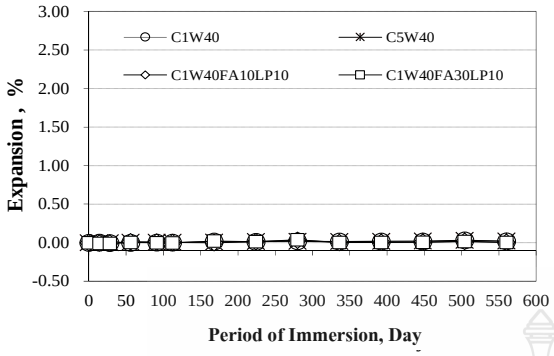
(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 20

ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

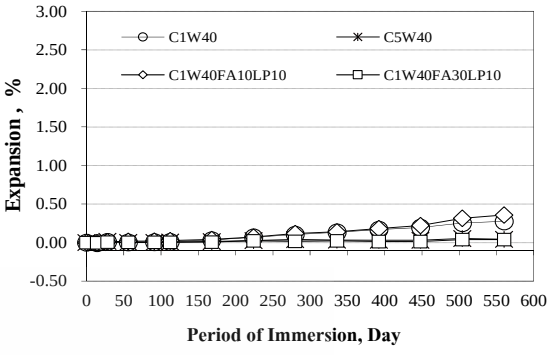
4) วัสดุประสานร่วมสามชนิด (Ternary) เมื่อแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.12 ถึงภาพที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนพบว่า (ภาพที่ 4.12 และภาพที่ 4.13) การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 จะมีค่าใกล้เคียงหรือมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 19.19) ในปริมาณที่ต่ำ ผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่ช่วยลด $Ca(OH)_2$ ได้น้อย ในขณะที่การเพิ่ม $Ca(OH)_2$ จากเถ้าลอยที่มี CaO สูง จึงทำให้เกิด Ettringite มากขึ้น แต่เมื่อแทนที่เถ้าลอยดังกล่าวในปริมาณที่สูง (ร้อยละ 30) กลับให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์น้อยลง (ซึ่งน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยลด $Ca(OH)_2$ ได้มาก ซึ่งผลดังกล่าวก็สอดคล้องกับการศึกษาของปิติศานต์และคณะ [14] แต่ในส่วนของผงหินปูนที่แทนที่นั้นก็มีส่วนช่วยเติมเต็มช่องว่าง แต่อาจมีผลต่อกลไกการทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟตไม่เด่นชัดเท่ากับการแทนที่ด้วยเถ้าลอย ส่วนเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ภาพที่ 4.14 และภาพที่ 4.15) ก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่ทุกการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมีค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ซึ่งเหตุผลดังได้กล่าวมาแล้ว

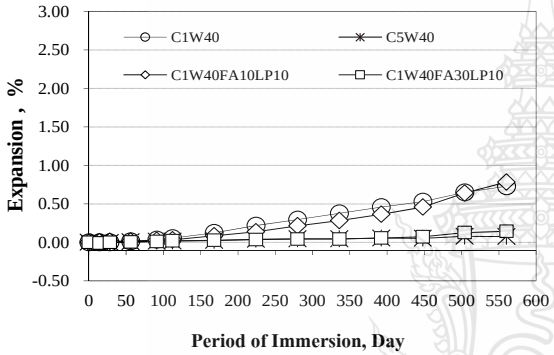
ส่วนภาพที่ 4.16 แสดงภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่ด้วยเถ้าลอย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่ด้วยผงหินปูน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟต ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ที่อายุการแช่ในสารละลาย 80 สัปดาห์ ซึ่งจะเห็นว่ารูปจะให้ผลสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ดังที่กล่าวมาแล้ว



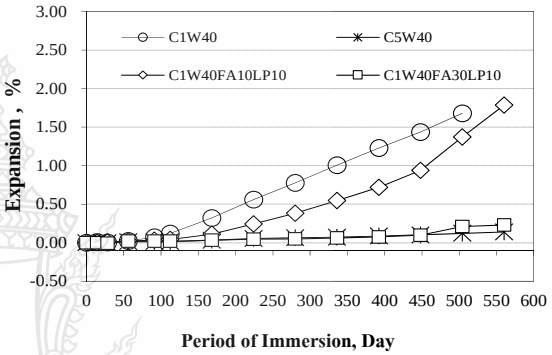
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



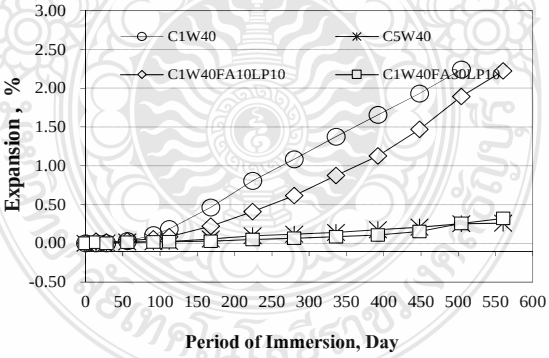
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

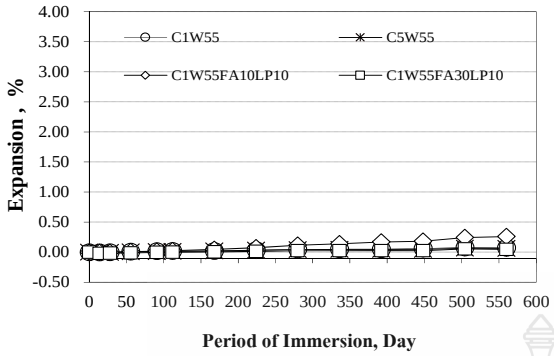


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

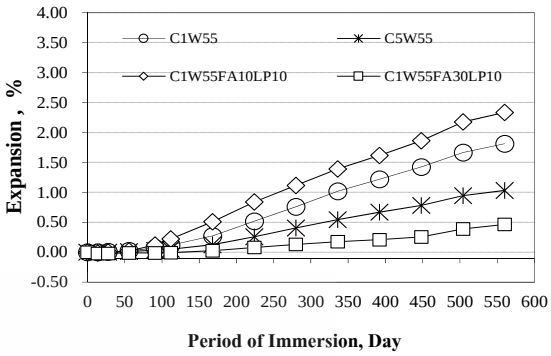


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 20

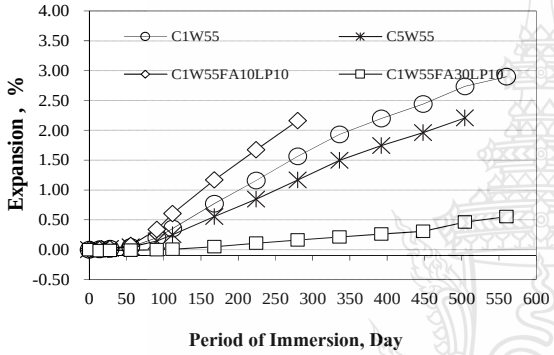
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



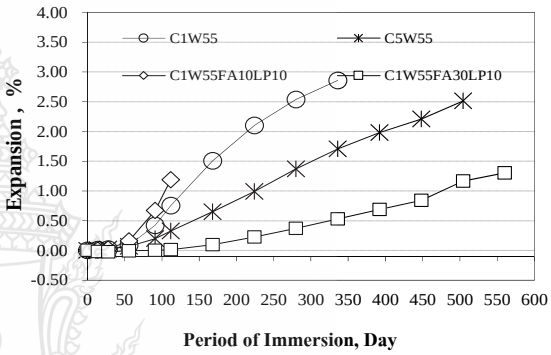
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



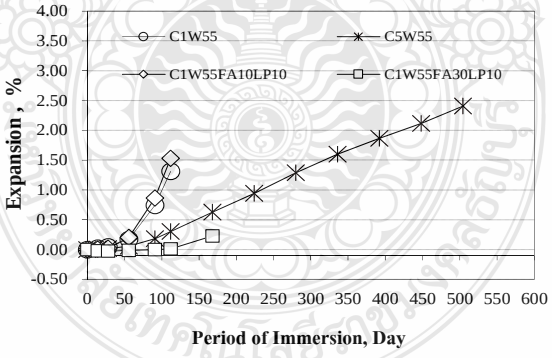
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

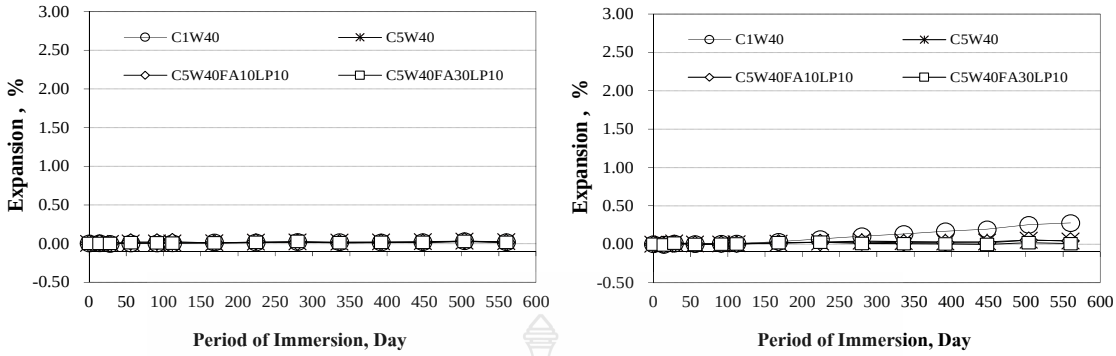


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

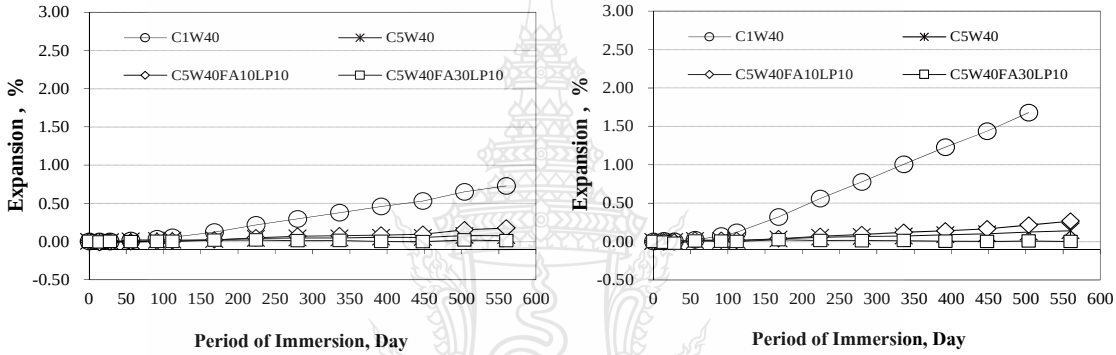


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

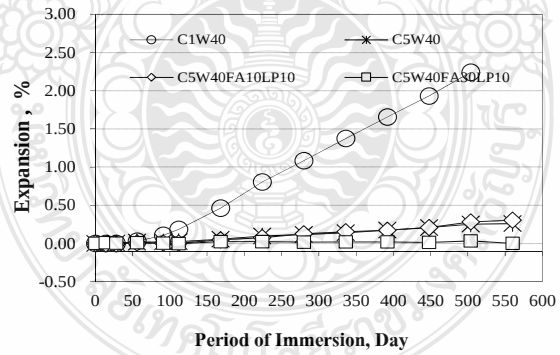
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1 (ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5

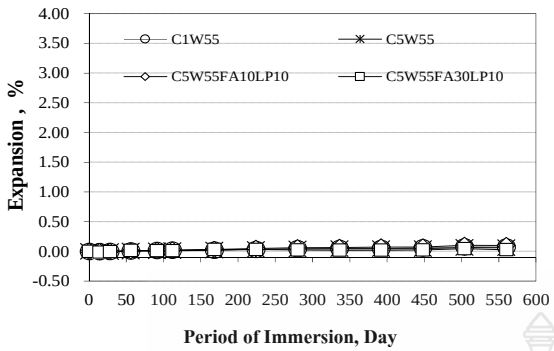


(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10 (ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

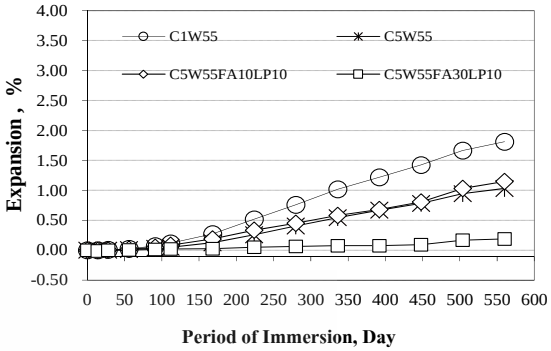


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 20

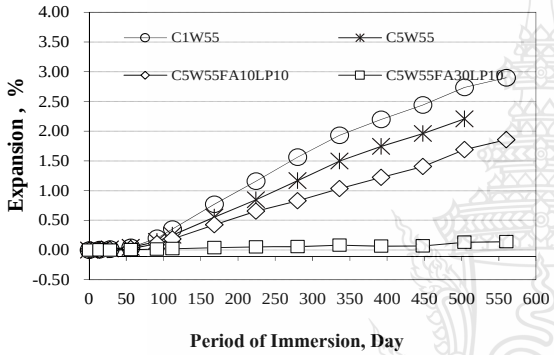
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



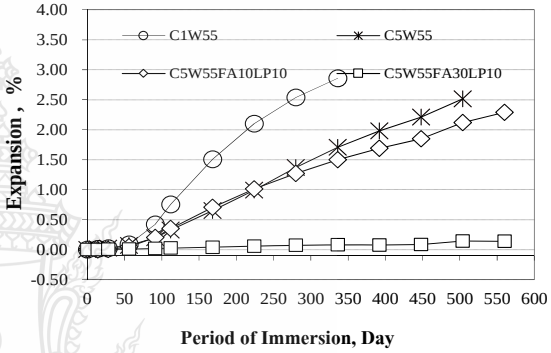
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



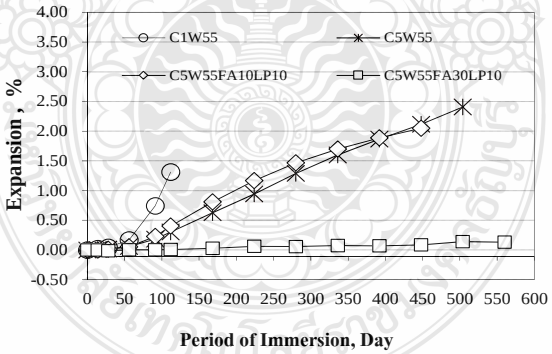
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

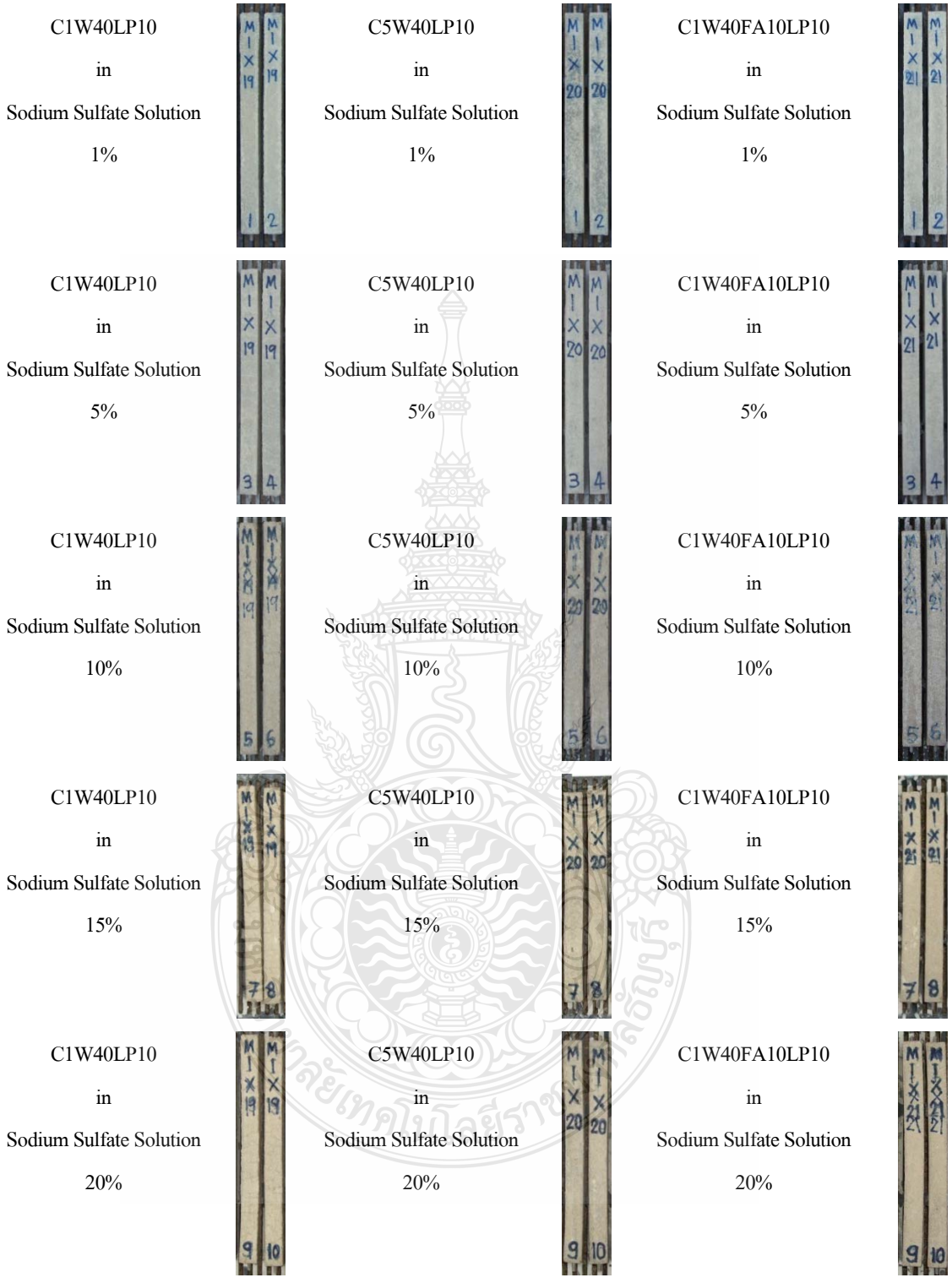


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

ภาพที่ 4.16 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

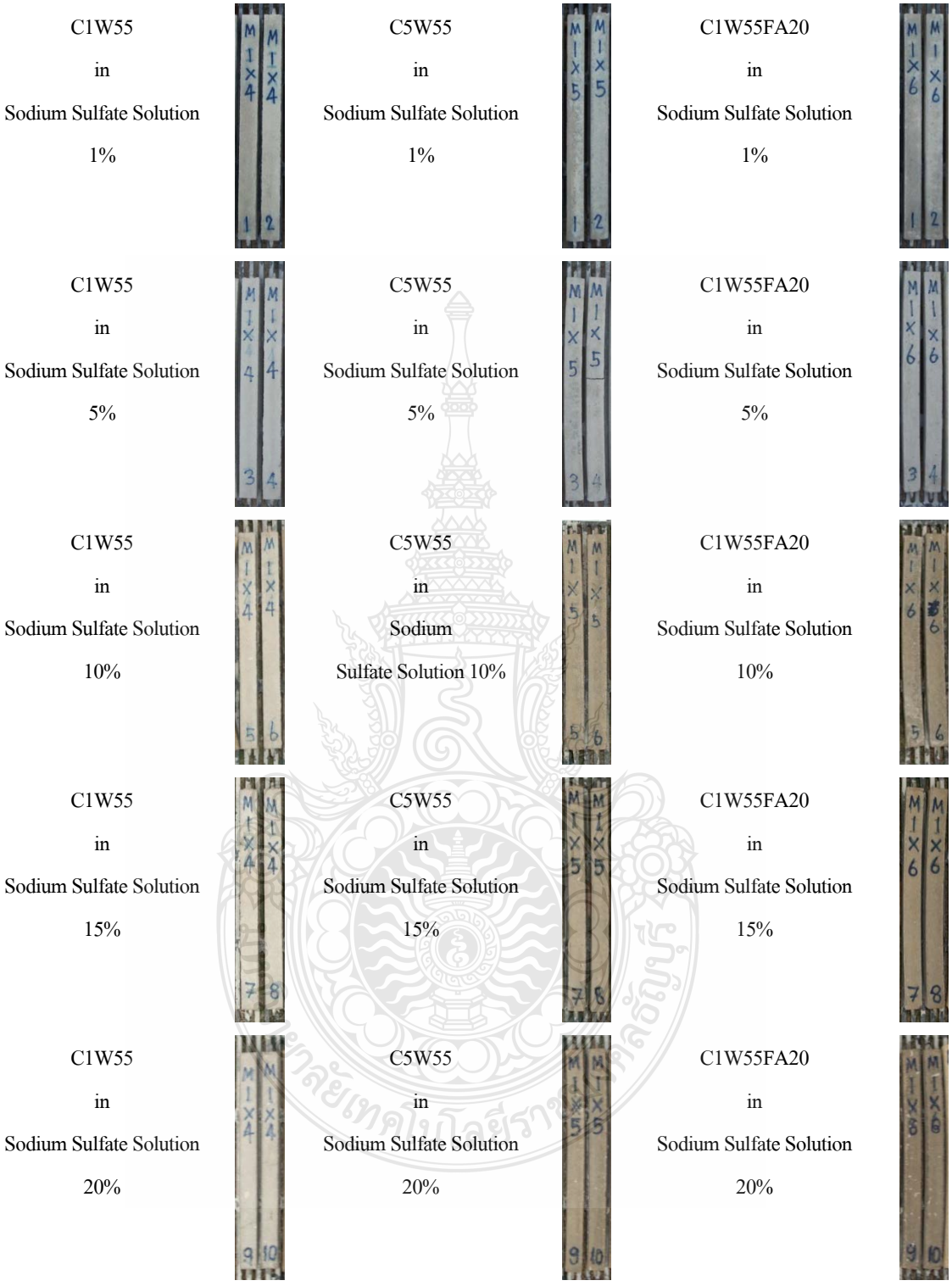
ภาพที่ 4.16 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ต่อ)



ภาพที่ 4.16 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ต่อ)

ภาพที่ 4.16 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ต่อ)

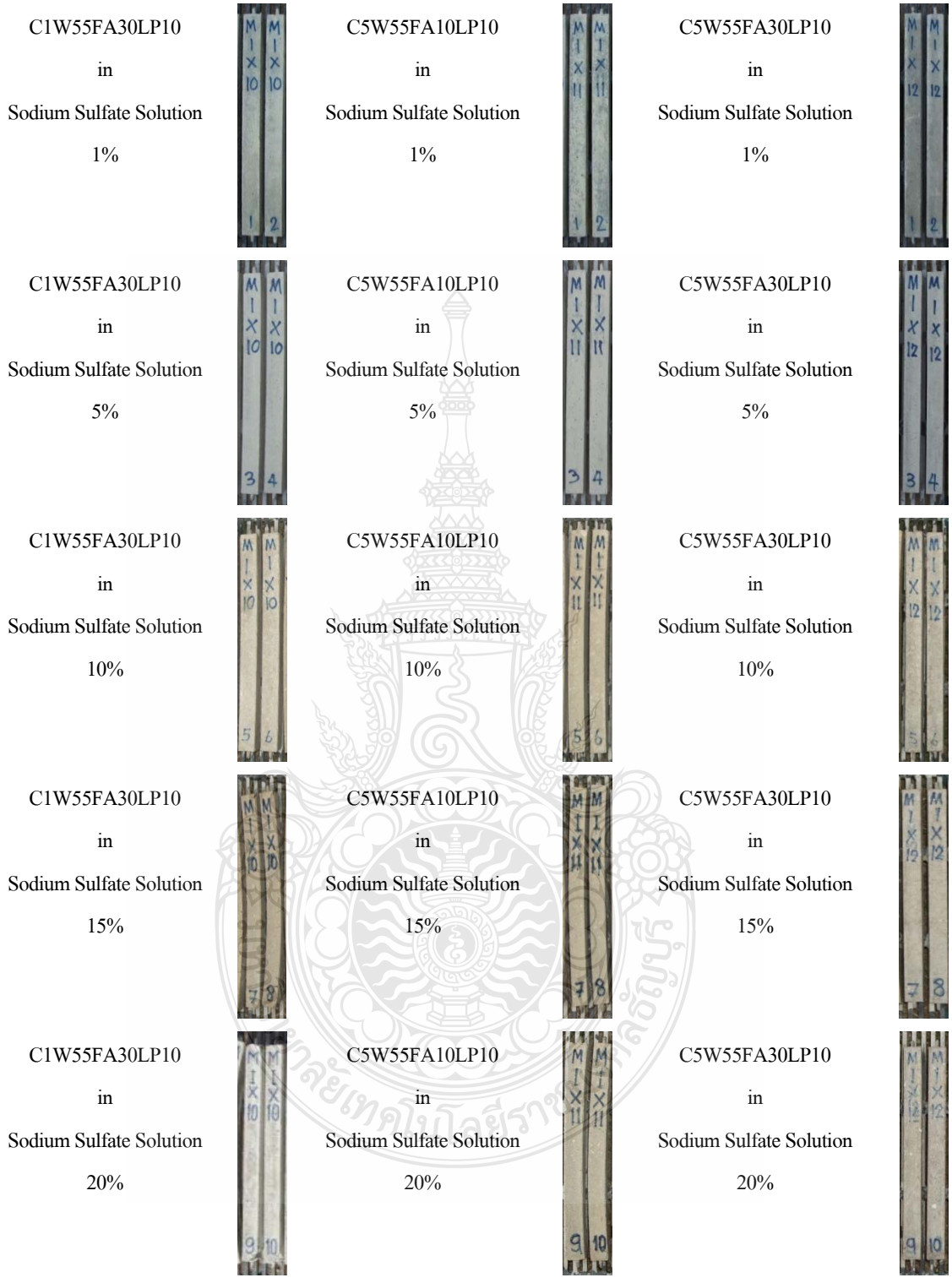
ภาพที่ 4.16 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ต่อ)



ภาพที่ 4.16 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ต่อ)

C1W55LP10 in Sodium Sulfate Solution 1%		C5W55LP10 in Sodium Sulfate Solution 1%		C1W55FA10LP10 in Sodium Sulfate Solution 1%	
C1W55LP10 in Sodium Sulfate Solution 5%		C5W55LP10 in Sodium Sulfate Solution 5%		C1W55FA10LP10 in Sodium Sulfate Solution 5%	
C1W55LP10 in Sodium Sulfate Solution 10%		C5W55LP10 in Sodium Sulfate Solution 10%		C1W55FA10LP10 in Sodium Sulfate Solution 10%	
C1W55LP10 in Sodium Sulfate Solution 15%		C5W55LP10 in Sodium Sulfate Solution 15%		C1W55FA10LP10 in Sodium Sulfate Solution 15%.	
C1W55LP10 in Sodium Sulfate Solution 20%		C5W55LP10 in Sodium Sulfate Solution 20%		C1W55FA10LP10 in Sodium Sulfate Solution 20%	

ภาพที่ 4.16 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ต่อ)

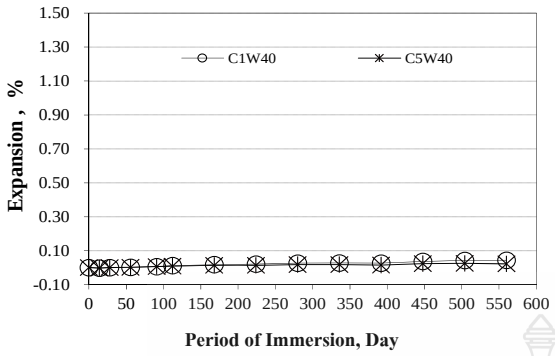


ภาพที่ 4.16 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ต่อ)

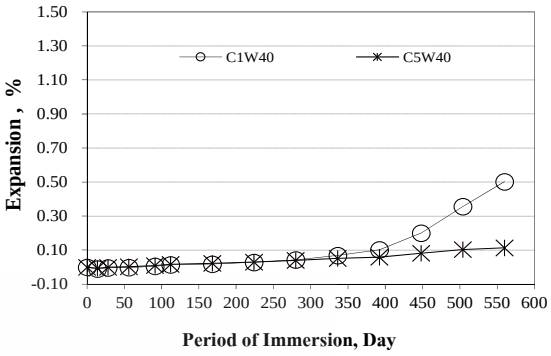
2. กรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

1) พิจารณาในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน

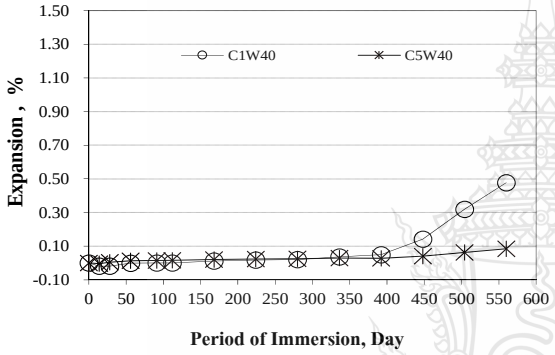
ภาพที่ 4.17 และภาพที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วนโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน นั้นมีค่าการขยายตัวที่ไม่แน่นอน บางกรณีค่าการขยายตัวของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าการขยายตัวมากกว่า บางกรณีมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะกลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นการเปลี่ยนแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลผลิตทางปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (หรือของปฏิกิริยาปอซโซลาน) ให้เป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน [12] มีผลให้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ถูกทำลายในลักษณะยุ่ย มีการหลุดล่อนของผิวตัวอย่างมอร์ต้าร์ จึงทำให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ออกมาค่อนข้างไม่แน่นอน แนะนำว่าในการประเมินการต้านทานซัลเฟตของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น ถ้าใช้เฉพาะวิธีวัดการขยายตัว บางครั้งไม่น่าจะเพียงพอต่อการประเมินความต้านทานซัลเฟตได้



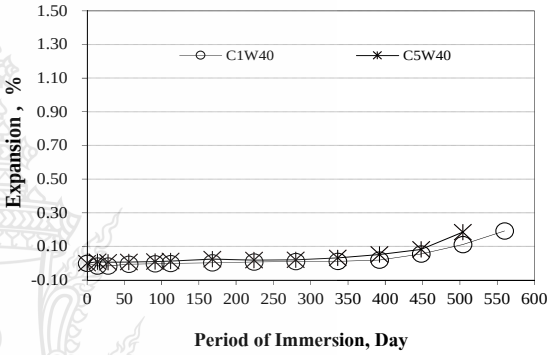
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



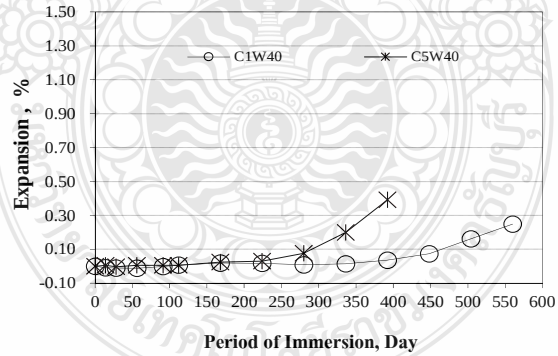
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

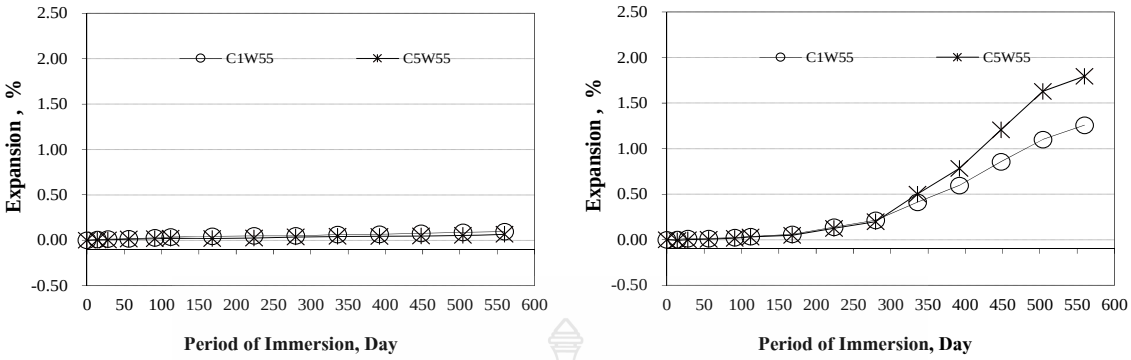


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

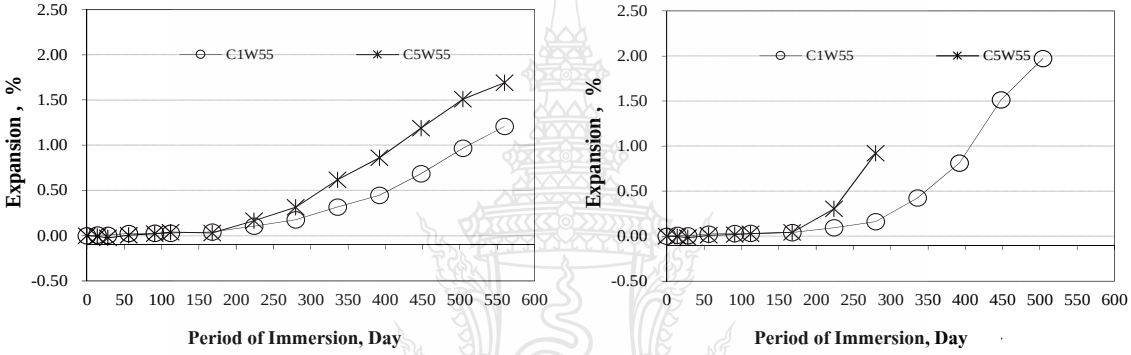


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

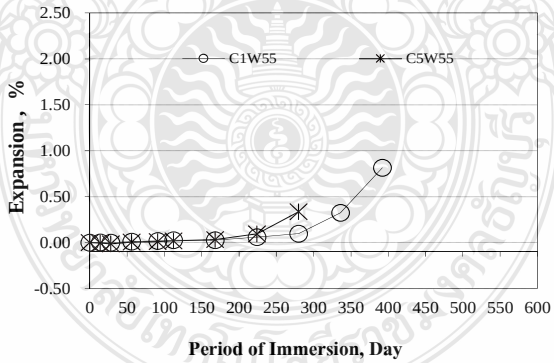
ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40



(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1 (ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10 (ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15



(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 20

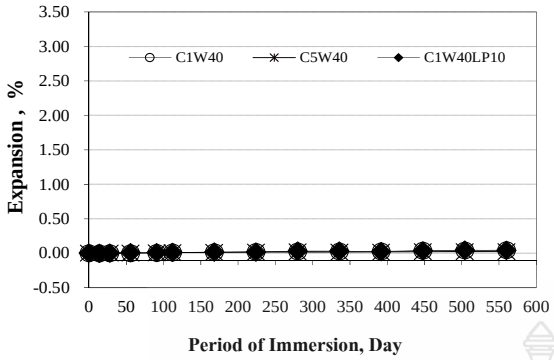
ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55

2) วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

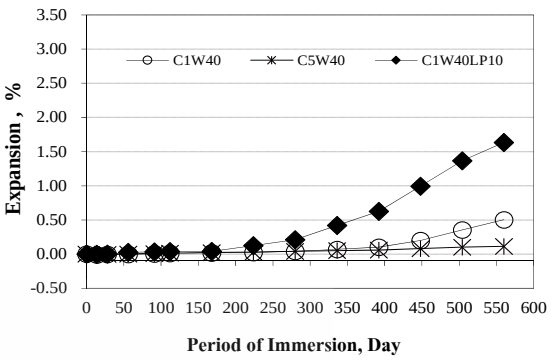
ภาพที่ 4.19 ถึงภาพที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 จะเห็นได้ว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อย (0.40) นั้น ไม่ว่าจะเป็นการแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือประเภทที่ 5 จะให้ค่าการขยายตัวมีแนวโน้มที่มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน (ภาพที่ 4.19 และ 4.21) ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อย จะทำให้สารละลายซัลเฟตเข้าทำลายได้ยาก ซึ่งกรณีของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้นจะเป็นการทำลายจากผิวข้างนอก จึงทำให้ผิวของตัวอย่างหลุดล่อนได้เร็วขึ้น เพราะสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะเข้มข้นที่ผิว จึงทำให้การขยายตัวจึงมีมากกว่า

ส่วนกรณีเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากขึ้น (0.55) จะสังเกตได้ว่าค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูน (ไม่ว่าจะแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือประเภทที่ 5) นั้น มีแนวโน้มน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน (ภาพที่ 4.20 และ 4.22) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่อใช้น้ำมากขึ้นในส่วนผสมมอร์ต้าร์ จึงทำให้มีช่องว่างมากขึ้น ในการที่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตสามารถเข้าไปในเนื้อมอร์ต้าร์จึงส่งผลให้สารละลายซัลเฟตกระจายการทำลายไปได้ทำให้การขยายตัวน้อยลง โดยเฉพาะกลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น เป็นการทำให้ตัวอย่างมอร์ต้าร์เกิดการยุ่ย หลุดล่อน ไม่ขยายตัวเท่ากับกรณีการทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟต

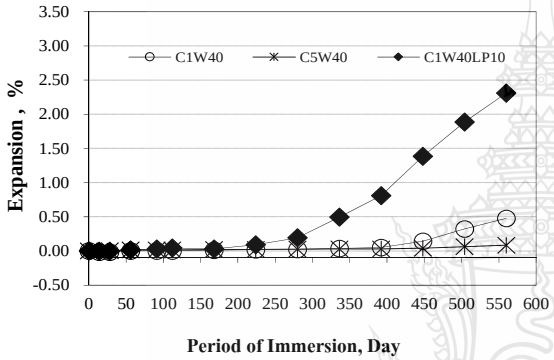
อย่างไรก็ตามจะสังเกตว่า กรณีความเข้มข้นสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 20 นั้น ผลออกมาไม่แน่นอน อาจเพราะเป็นความเข้มข้นที่สูงมาก จึงทำให้ไม่สามารถที่จะประเมินความแตกต่างได้



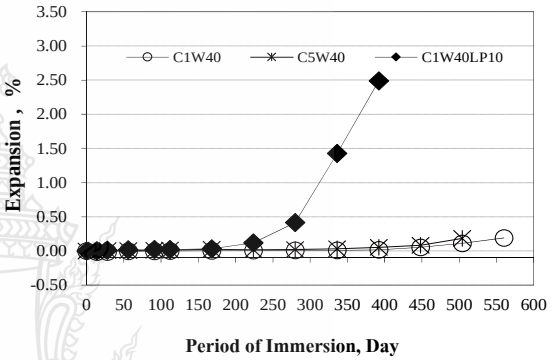
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



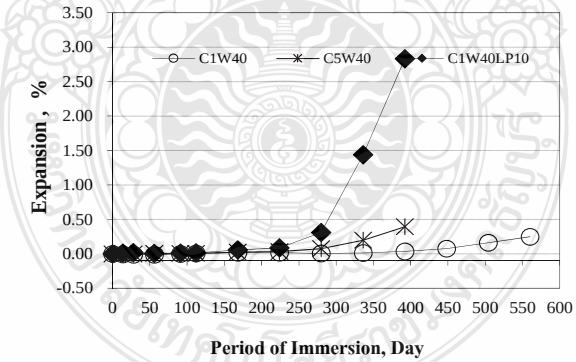
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

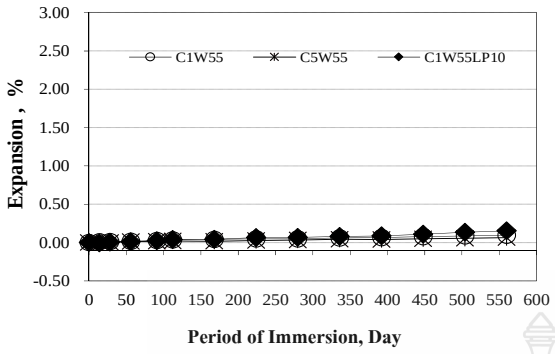


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

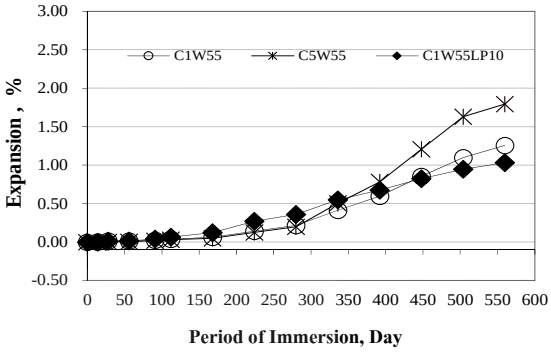


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 20

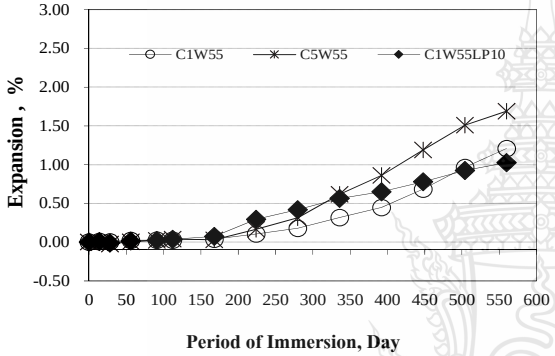
ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



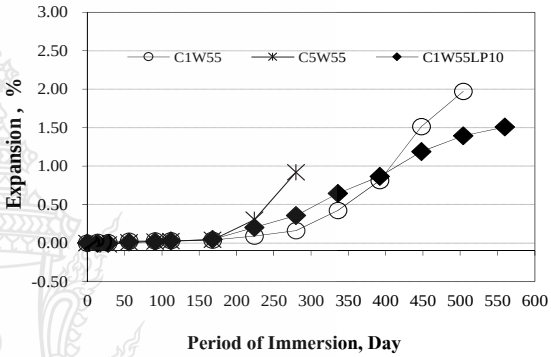
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



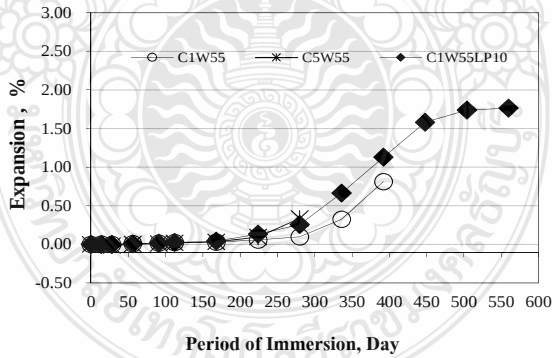
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

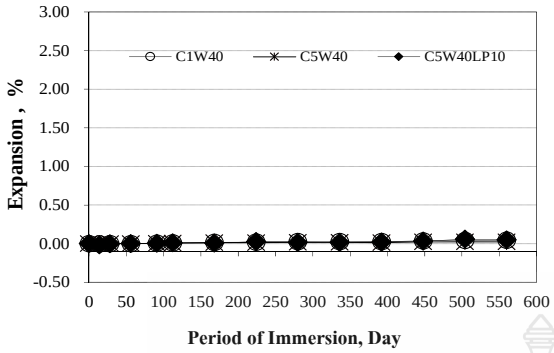


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

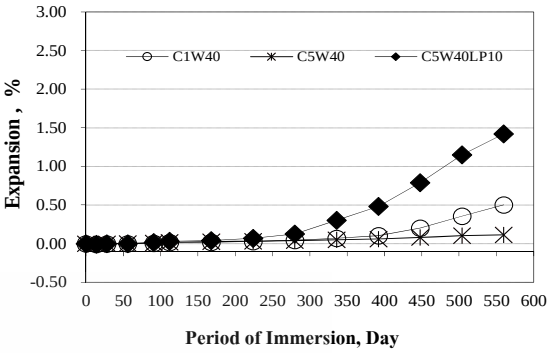


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

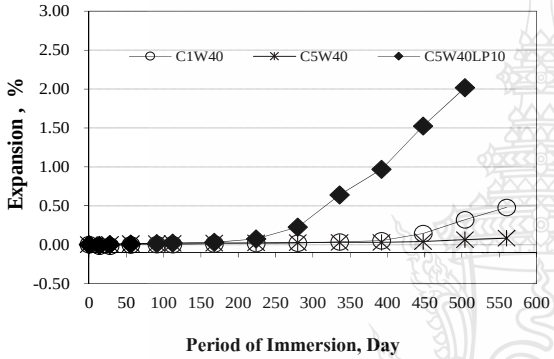
ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



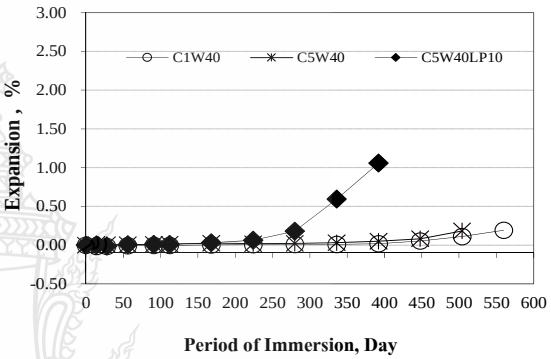
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



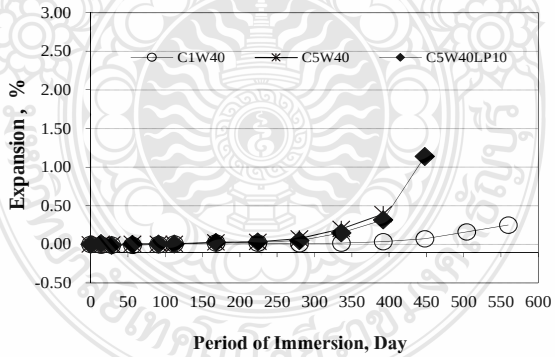
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

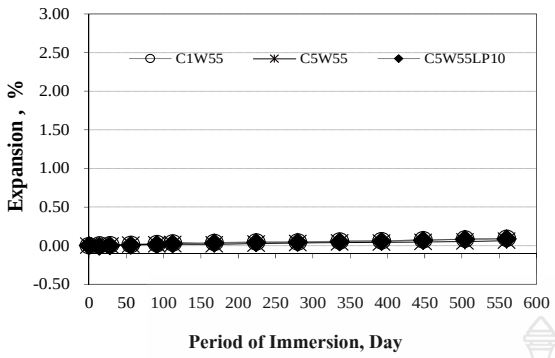


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

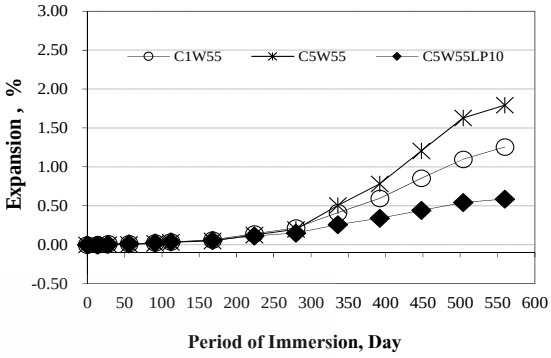


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 20

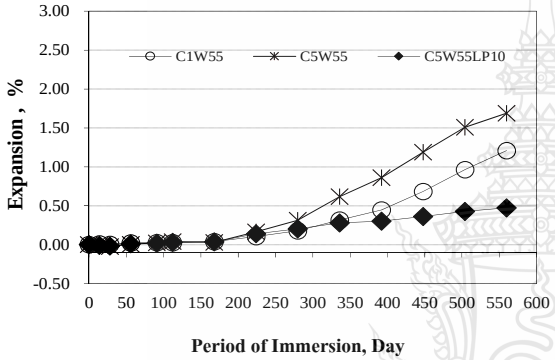
ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



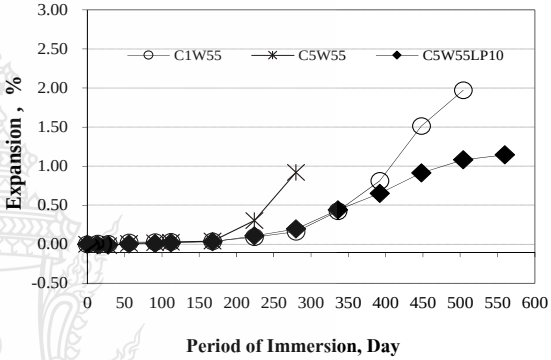
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



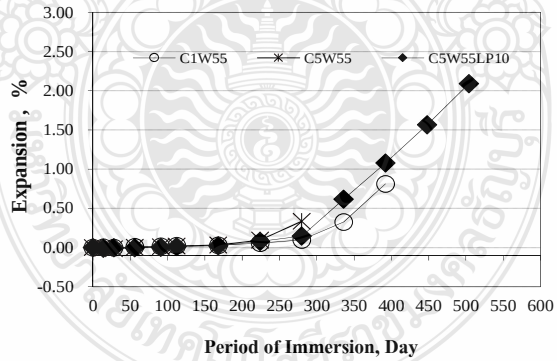
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15



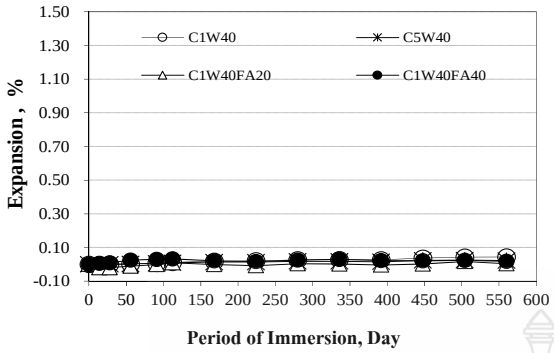
(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

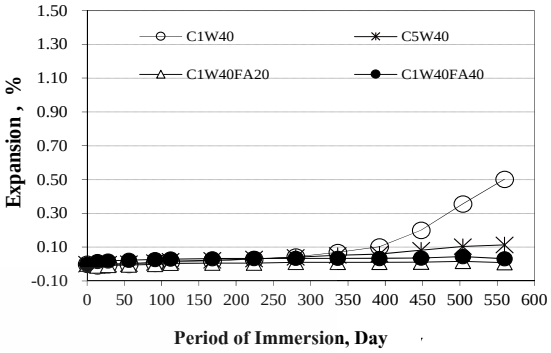
3) วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.23 ถึงภาพที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ไปในทิศทางทางเดียวกับกรณีในสารละลายโซเดียมซัลเฟต กล่าวคือการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ของเถ้าลอยทั้งของการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอย ซึ่งเป็นสารปอซโซลานไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) ซึ่งเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จึงทำให้เกิดการยิปซั่มน้อยลง และนอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยให้มอร์ต้าร์มีความทึบน้ำมากขึ้น เป็นผลให้การเข้าทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ยากขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยระหว่างร้อยละ 20 และ 40 พบว่าการแทนที่ด้วยปริมาณที่น้อยกว่า (ร้อยละ 20) จะมีค่าการขยายตัวมากกว่าเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากกว่า (ร้อยละ 40) ทั้งนี้เพราะเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้มากกว่ารวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นมากกว่าด้วย

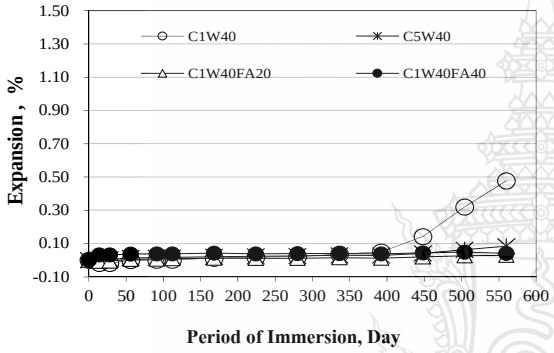
อย่างไรก็ตาม ก็มีบางกรณีที่การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าลอยมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน (ภาพที่ 4.26) ซึ่งดังที่ได้กล่าวแล้วว่าการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น มีกลไกที่จะทำให้ตัวอย่างเกิดการยุ่ย ผุกร่อน ซึ่งถ้าใช้การขยายตัวในการประเมินการต้านทานซัลเฟตนั้น จะไม่เป็นการประเมินที่ได้ผลชัดเจน เหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว



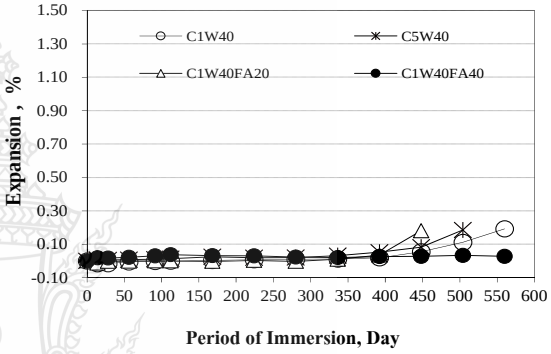
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



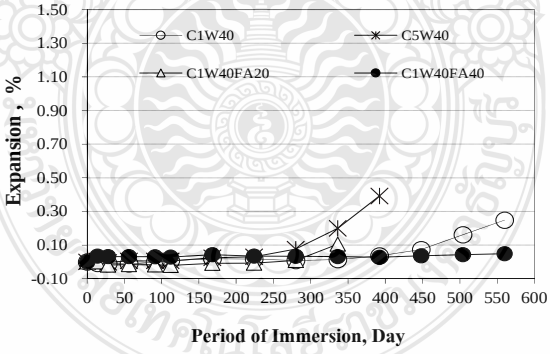
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

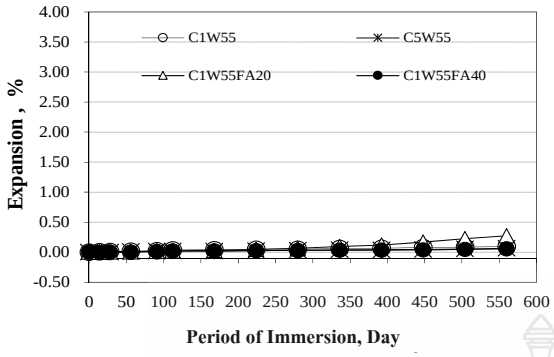


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

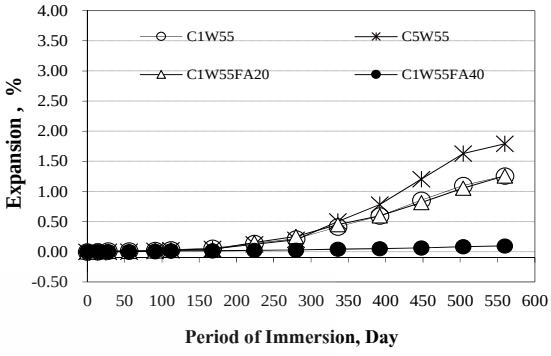


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 20

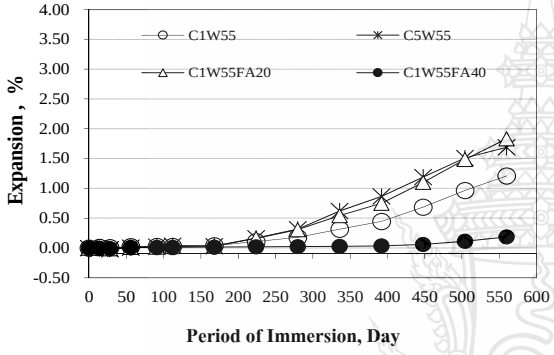
ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



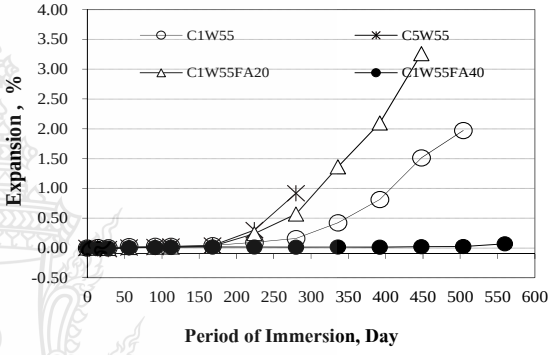
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



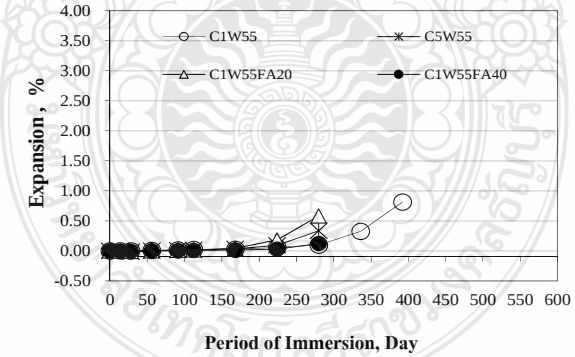
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

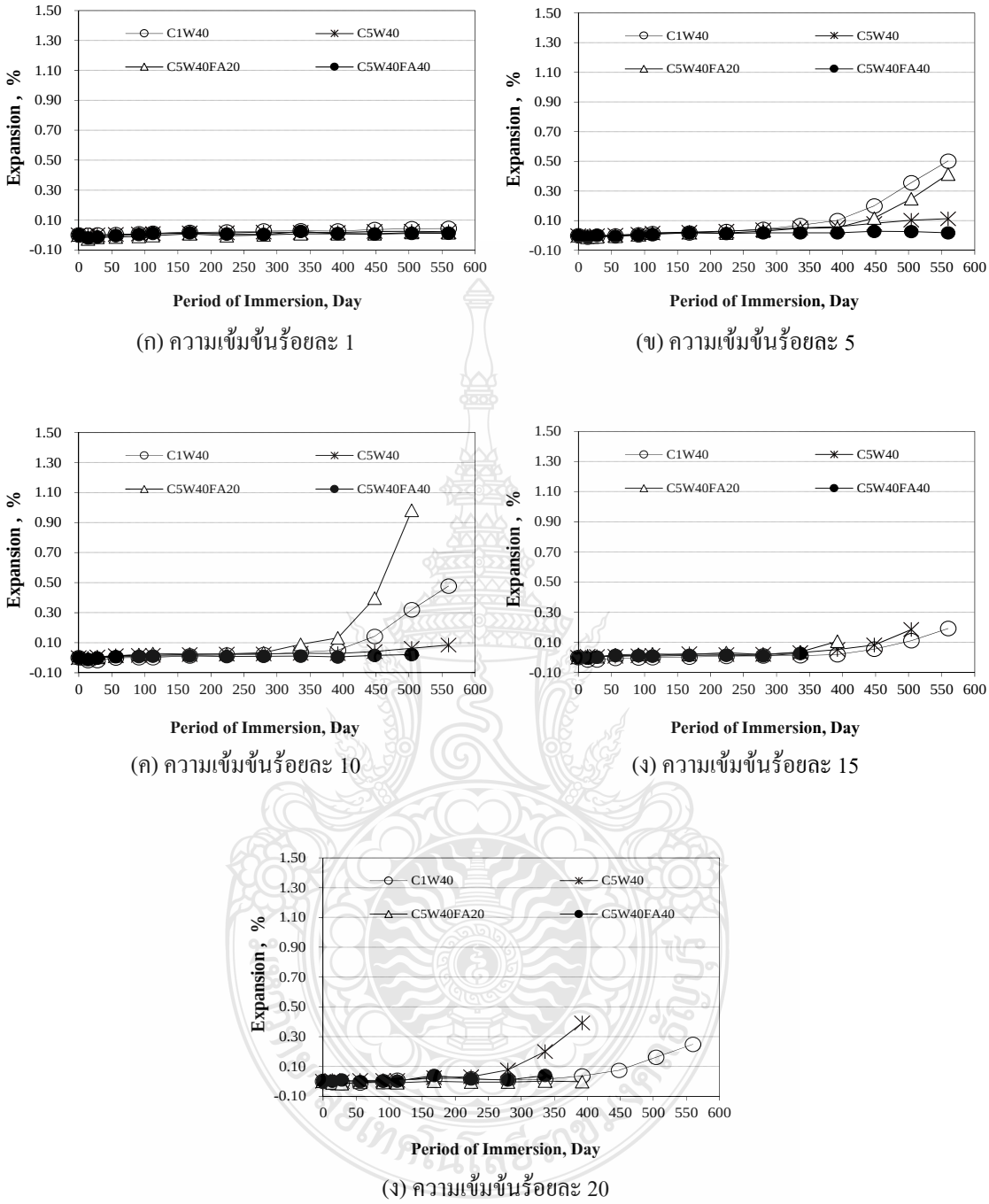


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15



(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 20

ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1

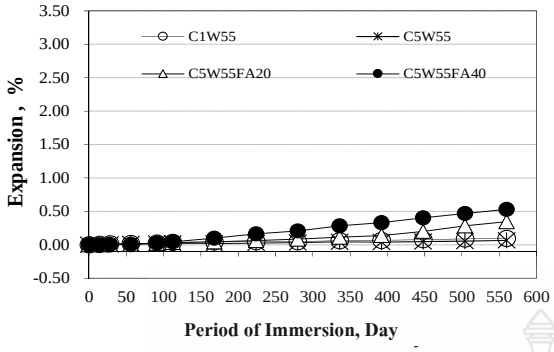
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5

(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

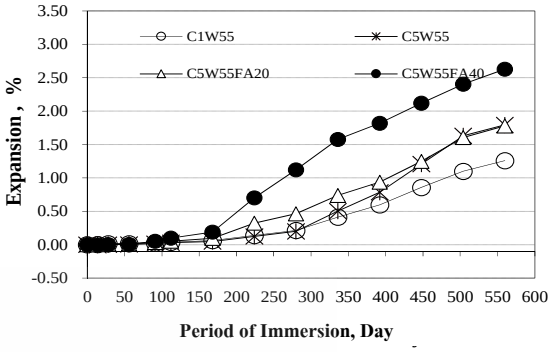
(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

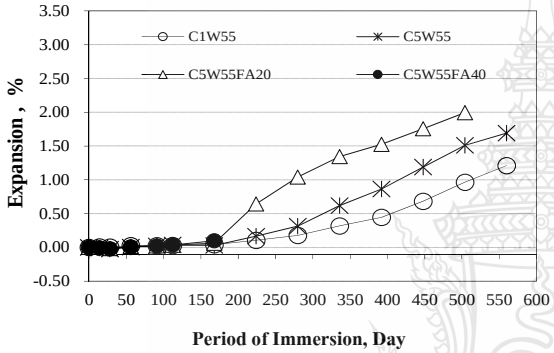
ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



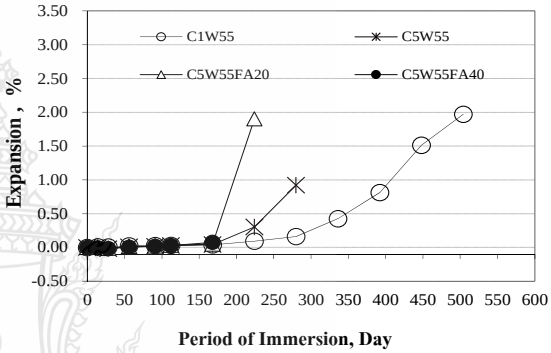
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



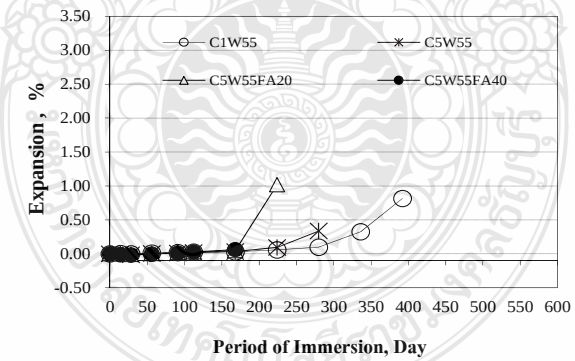
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15



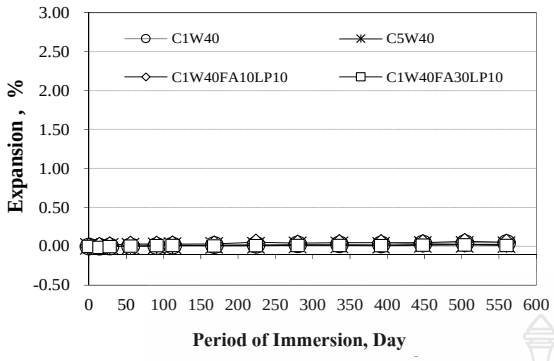
(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

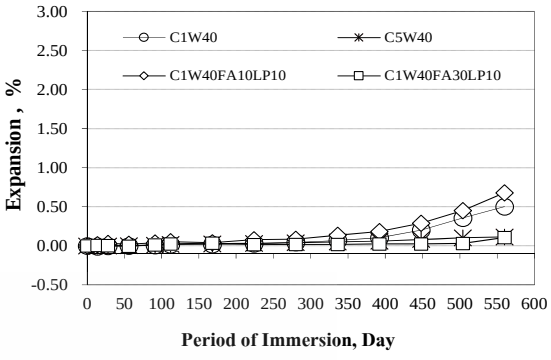
4) วัสดุประสานร่วมสามชนิด (Ternary) เมื่อแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.27 ถึงภาพที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน พบว่า การขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน (ทั้งแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 และทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55) มีแนวโน้มว่ามีค่าการขยายตัวมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเป็นการลดความเป็นด่างลง ซึ่งไม่มีเสถียรภาพในมอร์ต้าร์ส่งผลให้การหลุดล่อนของผิวตัวอย่างได้มากขึ้น รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานเป็นการเพิ่ม CSH ให้กับมอร์ต้าร์ จึงส่งผลให้เปลี่ยนเป็น MSH ได้มากขึ้น จึงทำให้มีการหลุดล่อนของเนื้อมอร์ต้าร์ได้มากขึ้น ส่งผลให้การขยายตัวมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ดังที่กล่าวแล้วว่ากลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นการเปลี่ยน CSH ให้เป็น MSH ดังนั้นการประเมินการต้านทานซัลเฟตโดยการวัดการขยายตัวนั้น บางครั้งจะทำให้ไม่สามารถบอกข้อแตกต่างได้ชัดเจนมากขึ้น ซึ่งสังเกตจากบางกรณีจะเห็นว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนนั้นมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

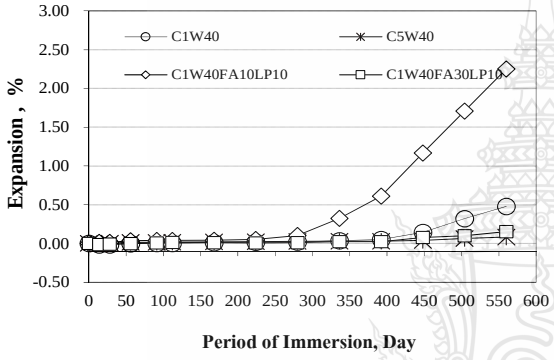
ส่วนภาพที่ 4.31 แสดงภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่ด้วยเถ้าลอย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่ด้วยผงหินปูน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนที่ความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ที่อายุการแช่ในสารละลาย 80 สัปดาห์ ซึ่งจะเห็นว่าภาพจะให้ผลสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ดังที่กล่าวมาแล้ว



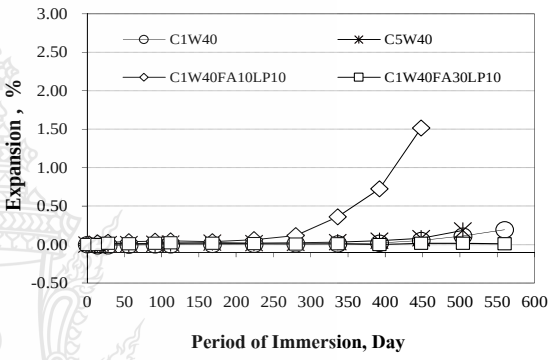
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



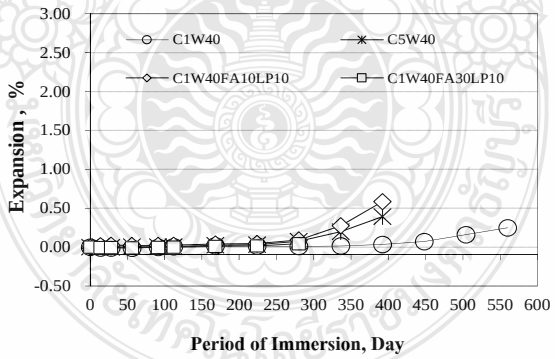
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

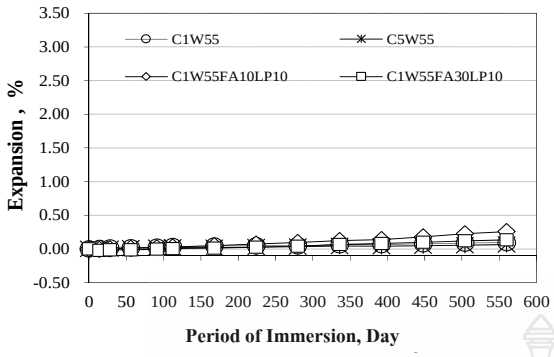


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

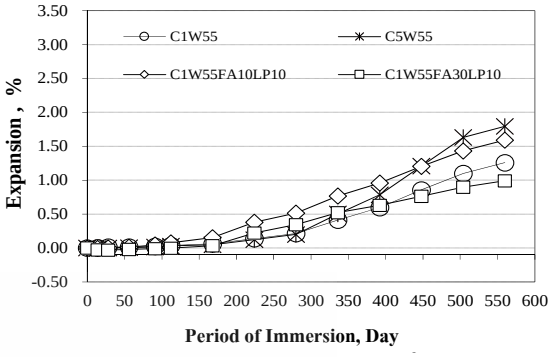


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

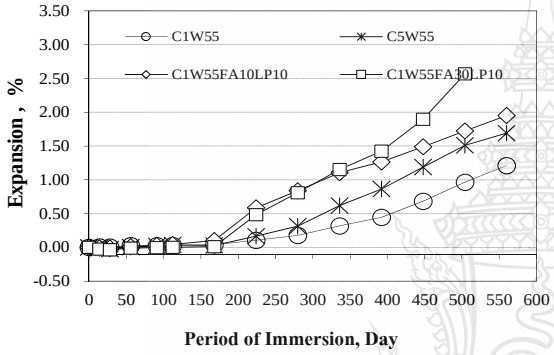
ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



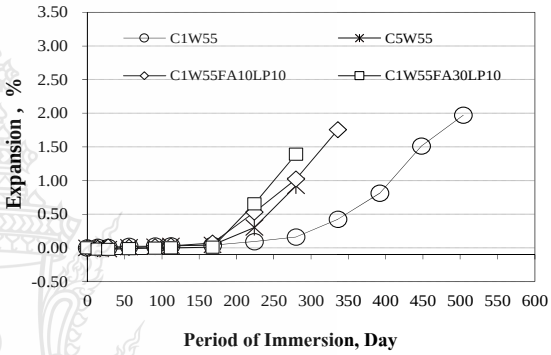
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



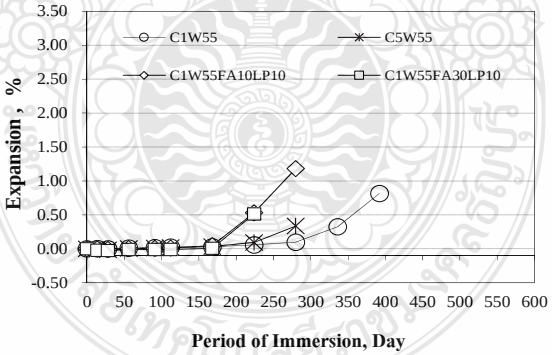
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

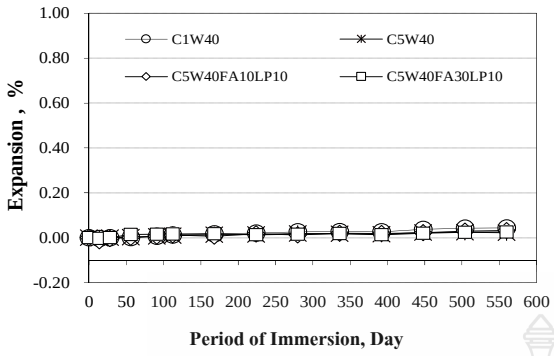


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

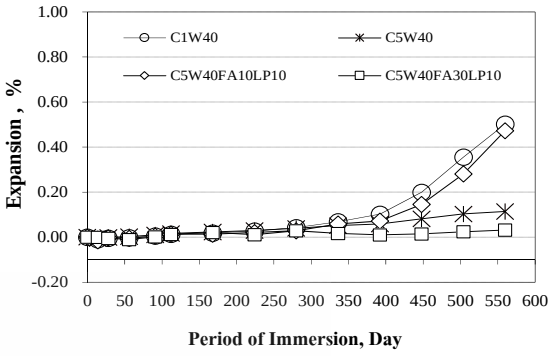


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

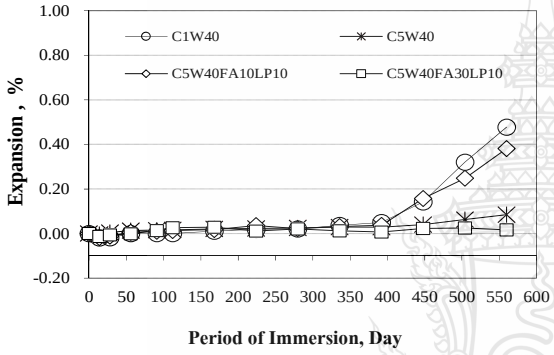
ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



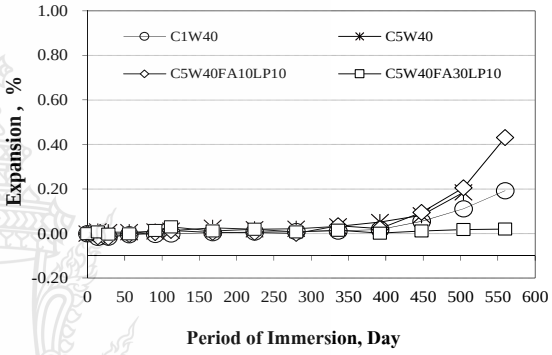
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



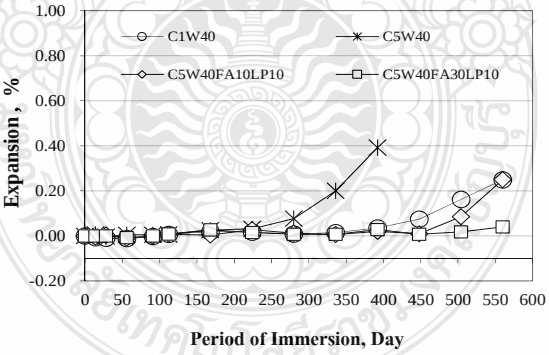
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

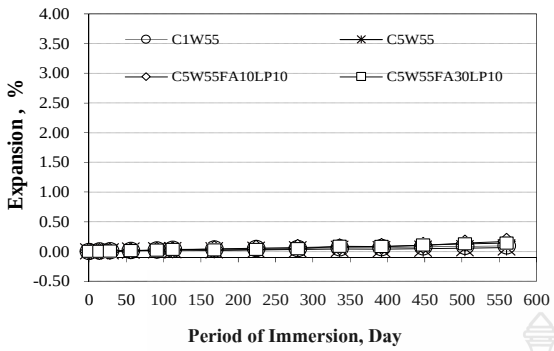


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

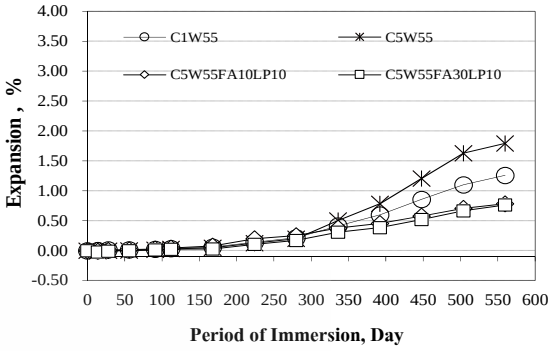


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 20

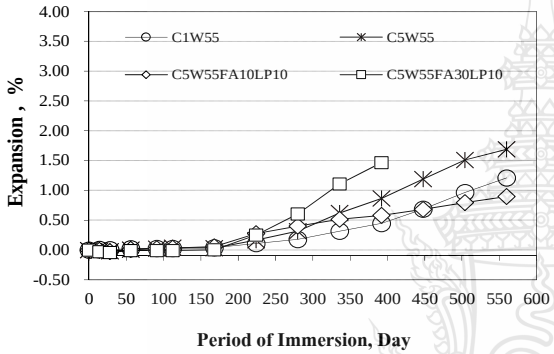
ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



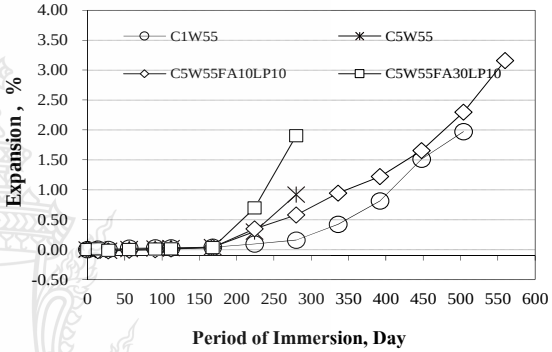
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



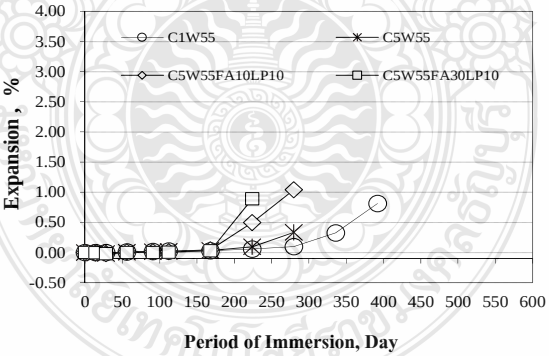
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

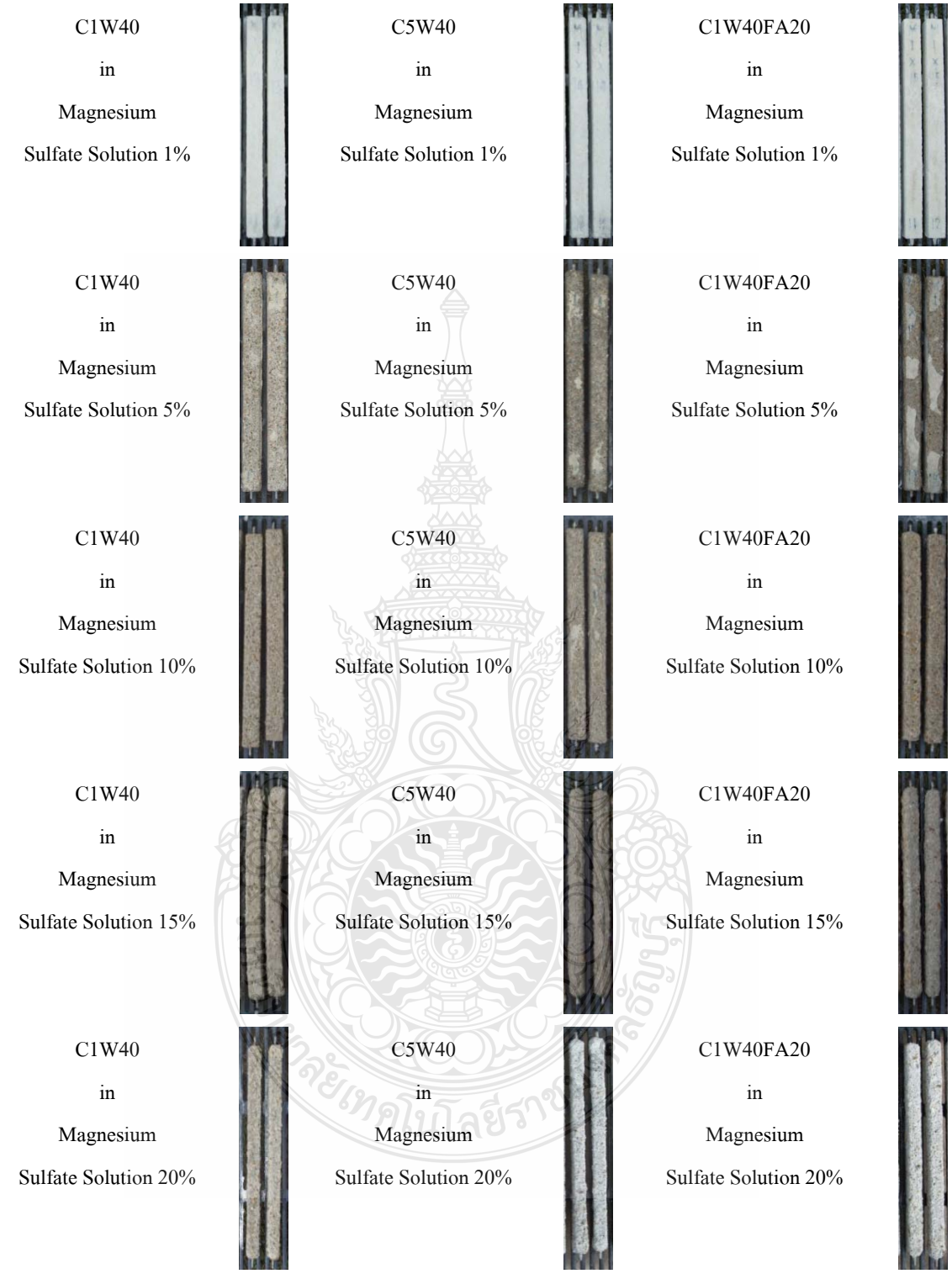


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15



(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 20

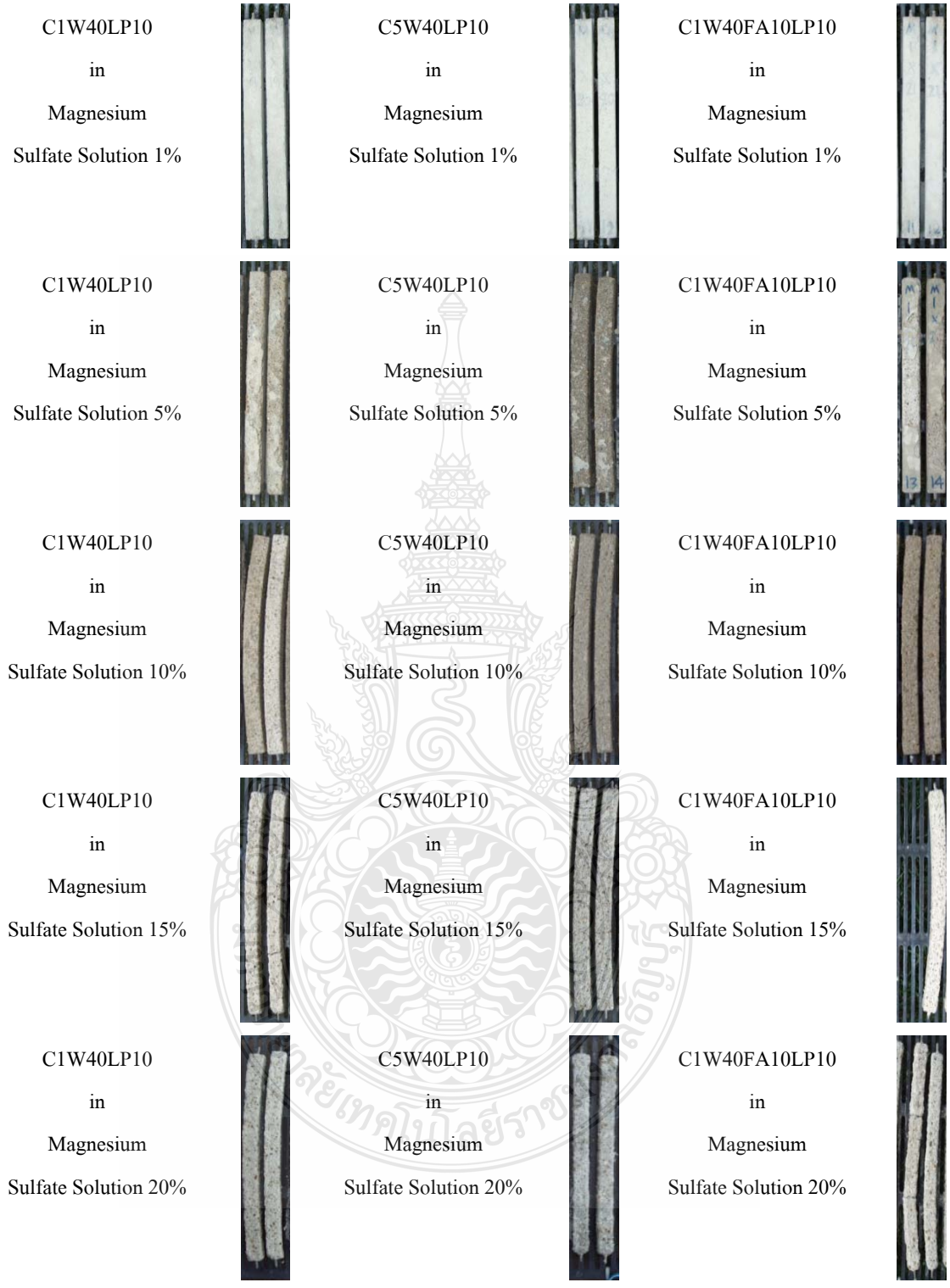
ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



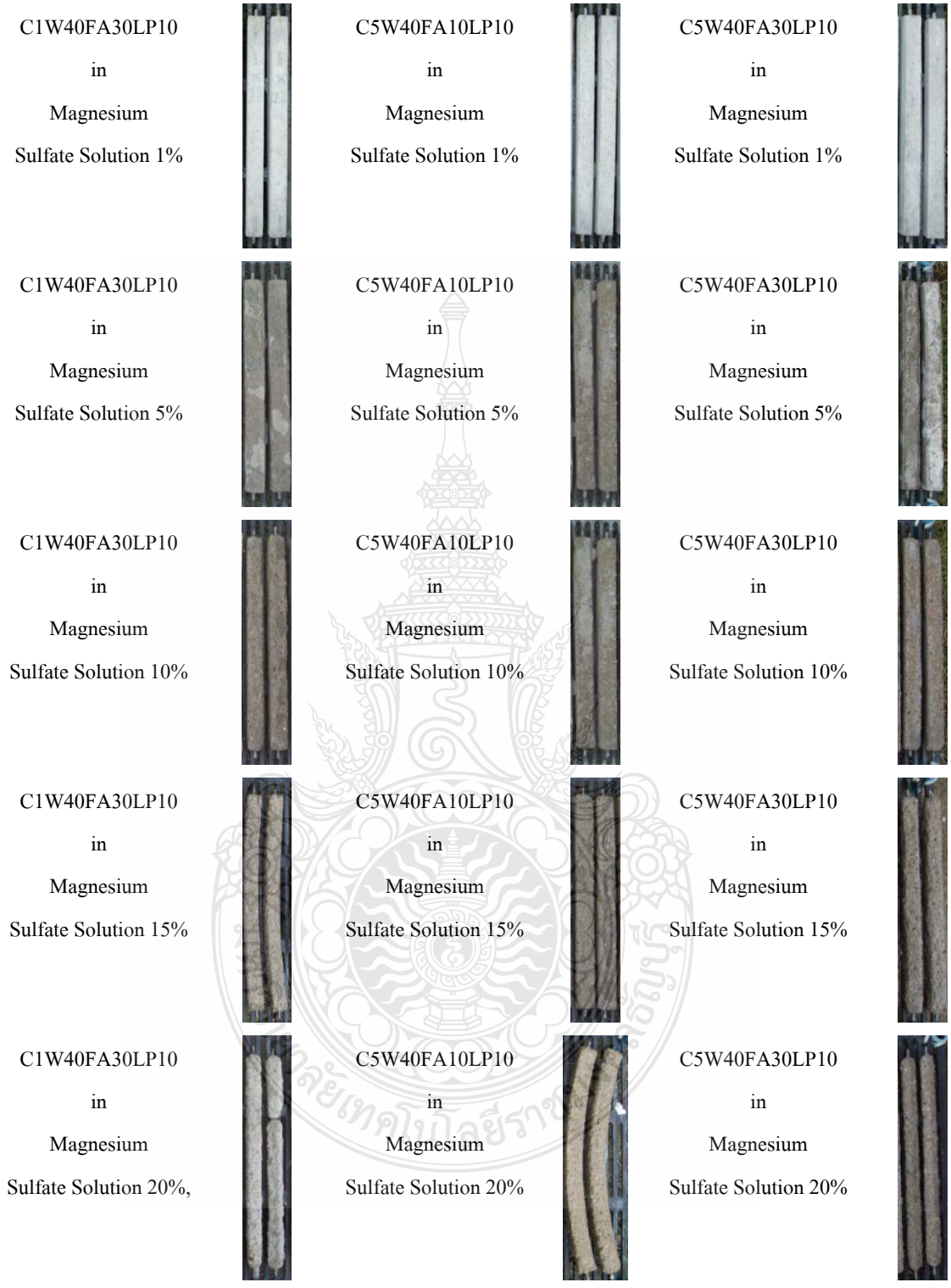
ภาพที่ 4.31 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุ 80 สัปดาห์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

C1W40FA40 in Magnesium Sulfate Solution 1%		C5W40FA20 in Magnesium Sulfate Solution 1%		C5W40FA40 in Magnesium Sulfate Solution 1%	
C1W40FA40 in Magnesium Sulfate Solution 5%		C5W40FA20 in Magnesium Sulfate Solution 5%		C5W40FA40 in Magnesium Sulfate Solution 5%	
C1W40FA40 in Magnesium Sulfate Solution 10%		C5W40FA20 in Magnesium Sulfate Solution 10%		C5W40FA40 in Magnesium Sulfate Solution 10%	
C1W40FA40 in Magnesium Sulfate Solution 15%		C5W40FA20 in Magnesium Sulfate Solution 15%		C5W40FA40 in Magnesium Sulfate Solution 15%	
C1W40FA40 in Magnesium Sulfate Solution 20%		C5W40FA20 in Magnesium Sulfate Solution 20%		C5W40FA40 in Magnesium Sulfate Solution 20%	

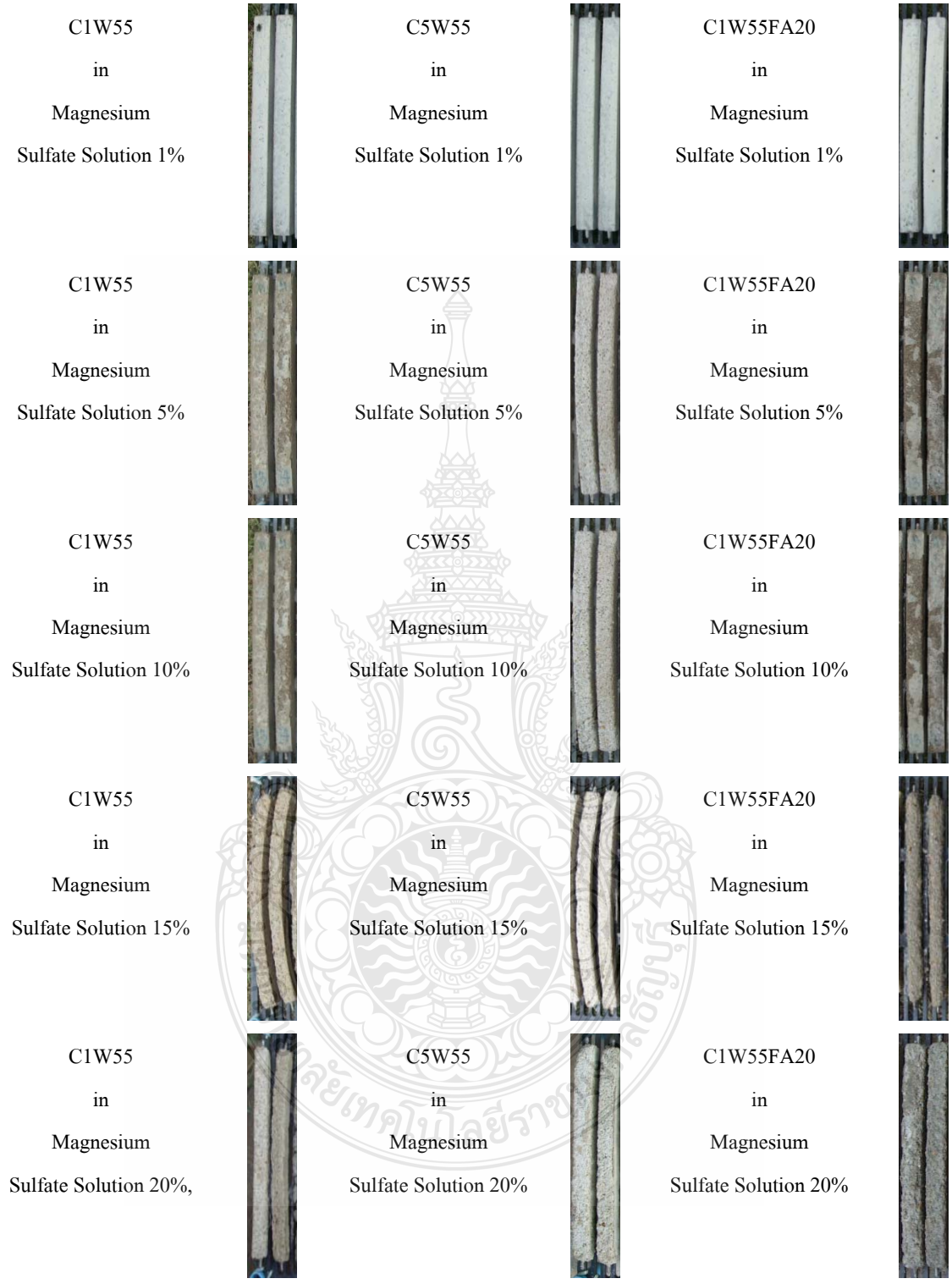
ภาพที่ 4.31 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุ 80 สัปดาห์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)



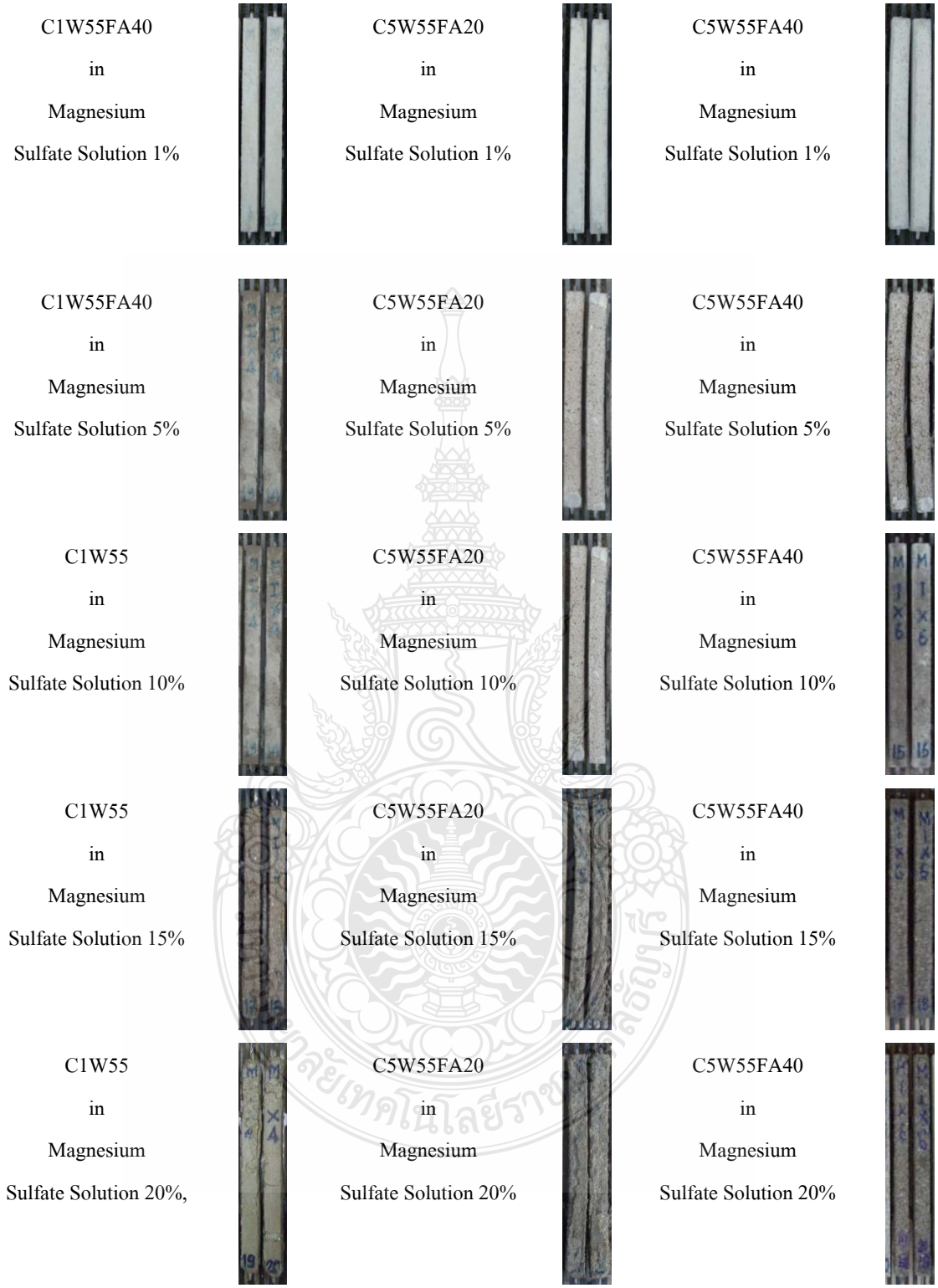
ภาพที่ 4.31 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุ 80 สัปดาห์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)



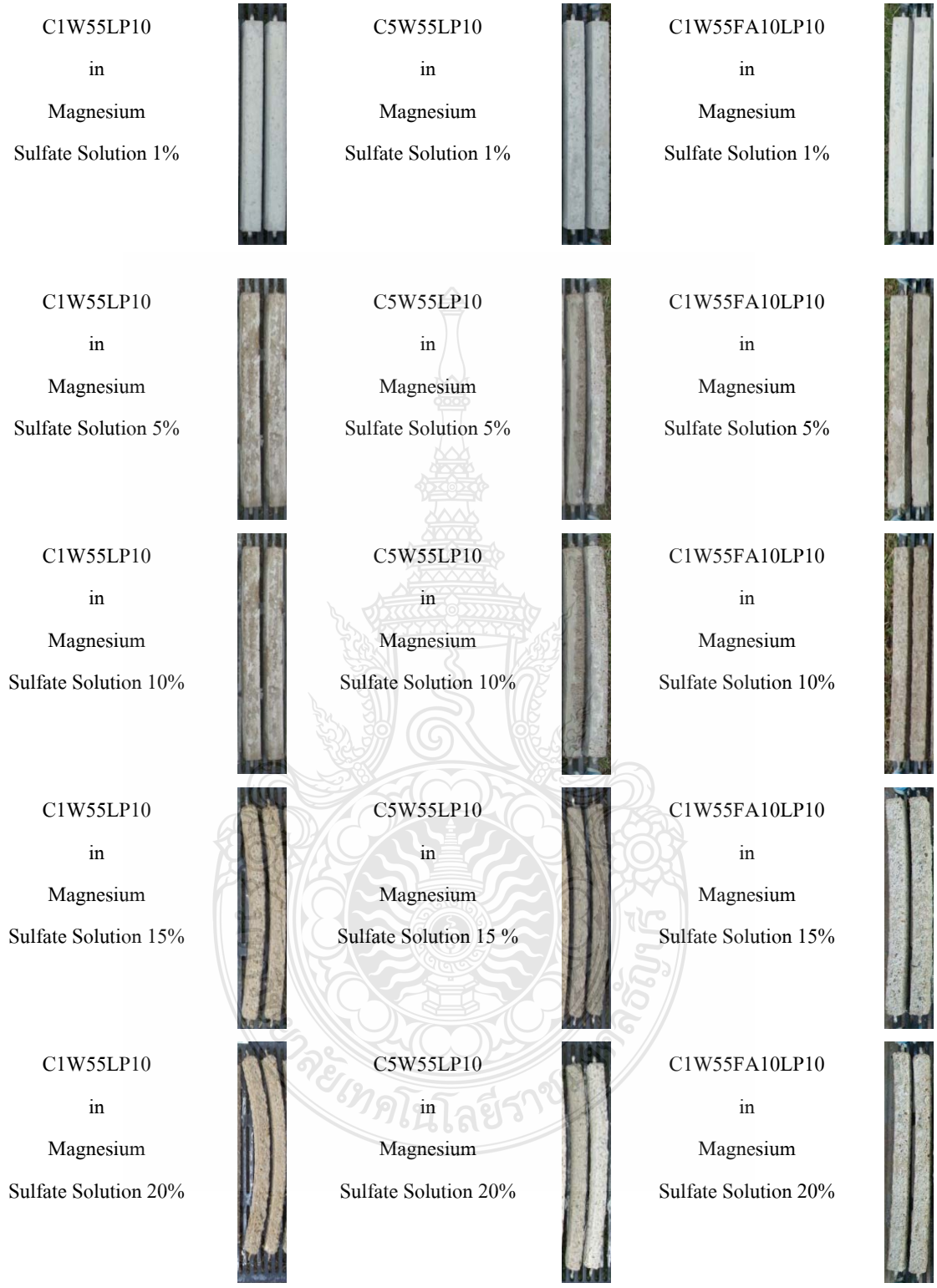
ภาพที่ 4.31 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุ 80 สัปดาห์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)



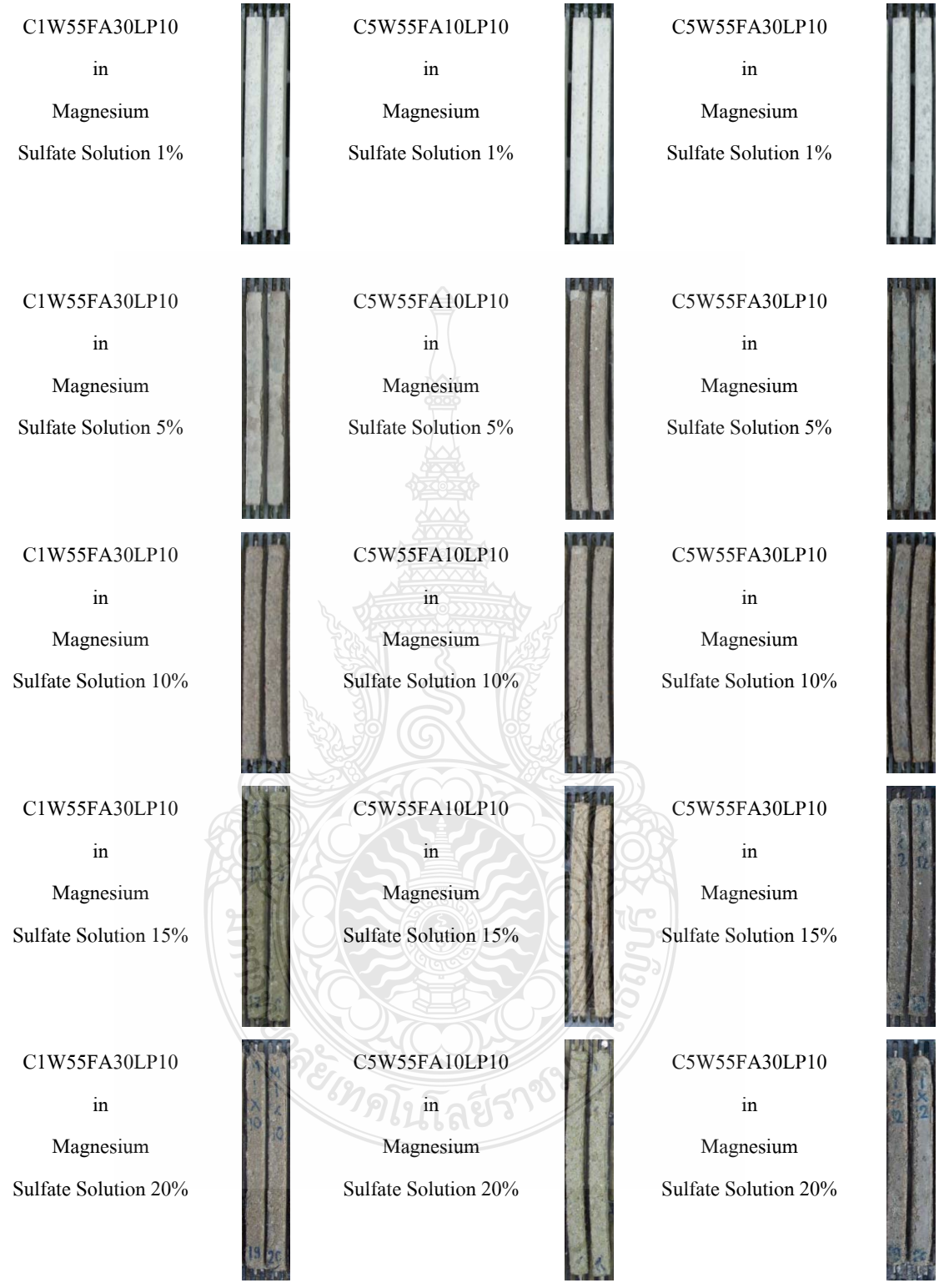
ภาพที่ 4.31 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุ 80 สัปดาห์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)



ภาพที่ 4.31 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุ 80 สัปดาห์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)



ภาพที่ 4.31 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุ 80 สัปดาห์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)

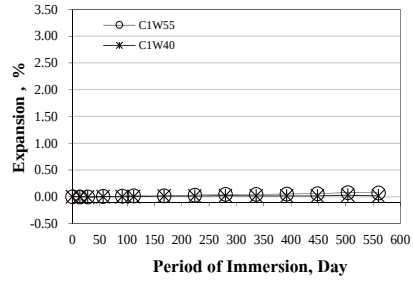


ภาพที่ 4.31 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุ 80 สัปดาห์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)

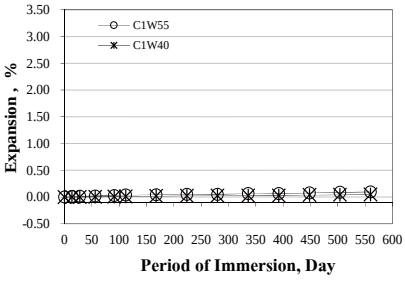
4.2.1.2 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

สำหรับอัตราส่วนต่อน้ำวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบต่อการต้านทานซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ใช้อัตราส่วน 0.40 และ 0.55

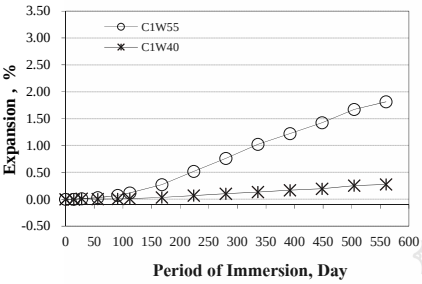
ภาพที่ 4.32 ถึงภาพที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุประสานในการศึกษา ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย และผงหินปูน โดยเถ้าลอยใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 40 โดยน้ำหนัก ส่วนผงหินปูนจะใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก สำหรับการแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 นั้น ได้ใช้อัตราส่วน เถ้าลอยต่อผงหินปูนดังนี้คือ เถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 เถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ทุกสัดส่วนการแทนที่โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานใช้อัตราส่วน 0.40 และ 0.55 พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ (ทุกสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ และทุกความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต) ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 มีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ทั้งนี้ เนื่องจากการลดลงของค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ทำให้ปริมาณโพรงคาปิลาร์ และการซึมผ่านได้ของคอนกรีตลดลง ดังนั้น การทำลายของซัลเฟตจึงเกิดขึ้นได้น้อยลงตาม



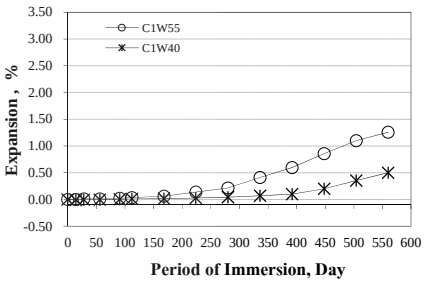
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



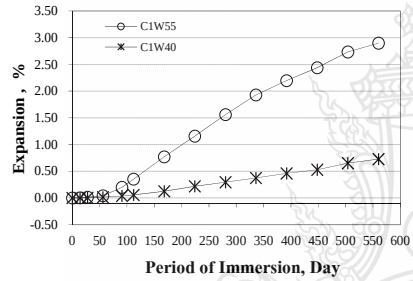
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



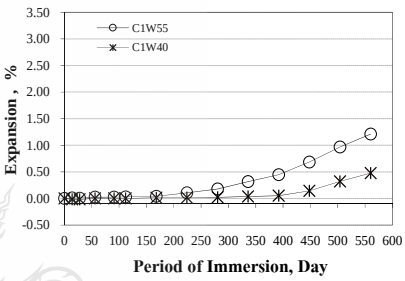
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



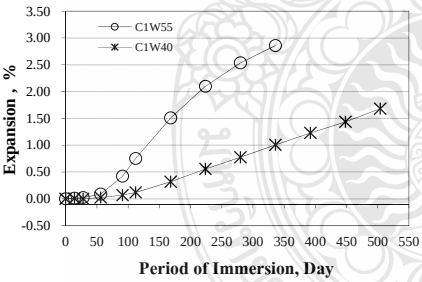
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



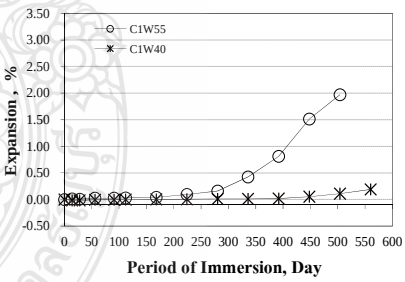
(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



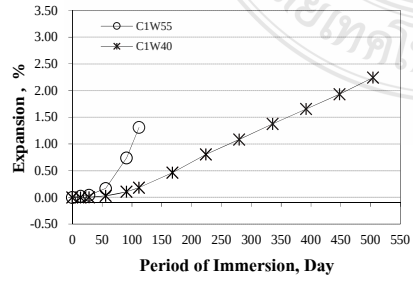
(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



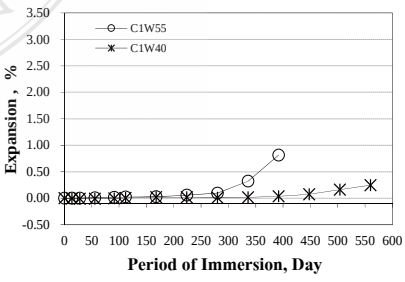
(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15



(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

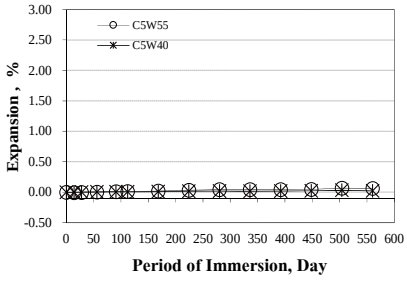


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

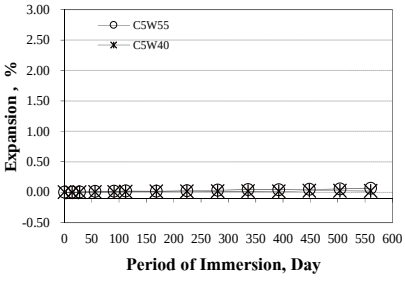


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

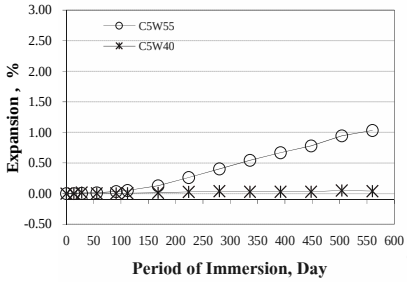
ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55



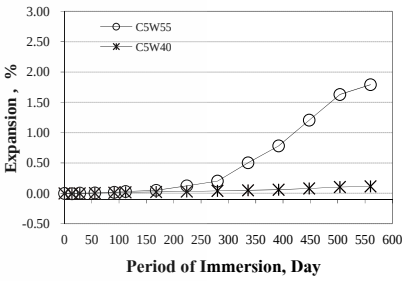
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



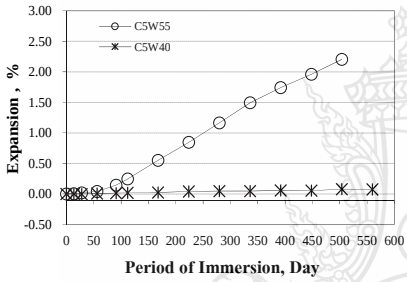
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



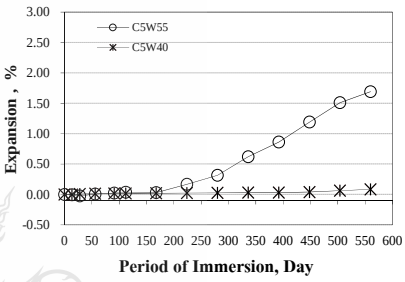
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



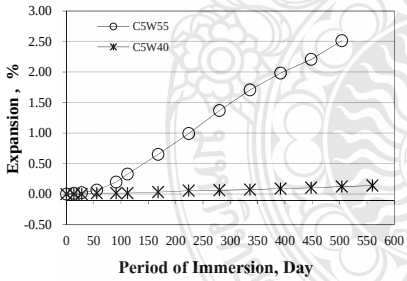
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



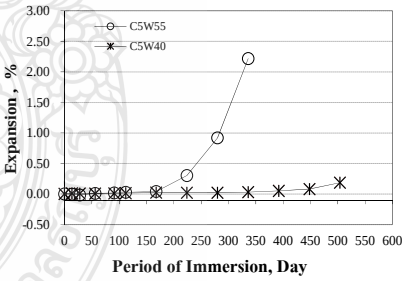
(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



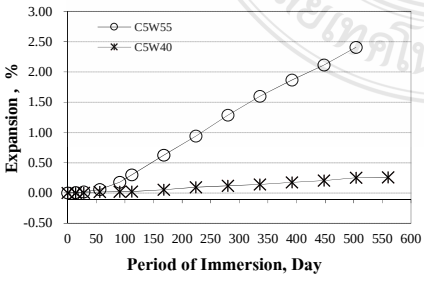
(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



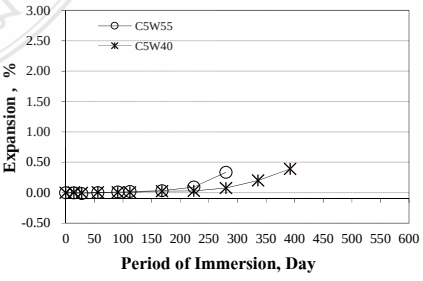
(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15



(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

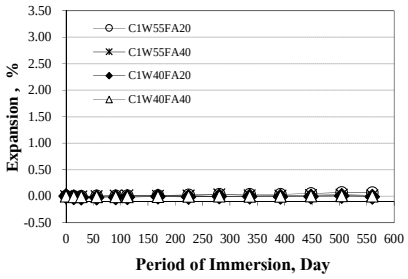


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

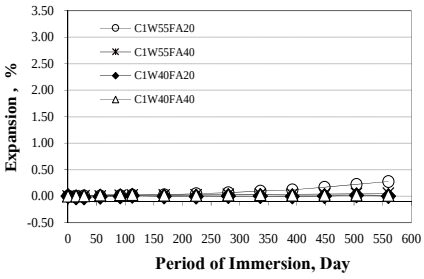


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

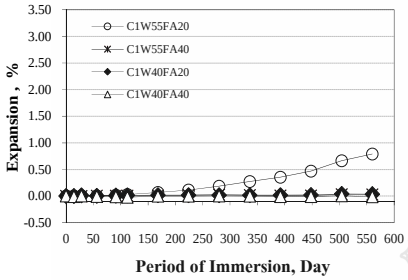
ภาพที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55



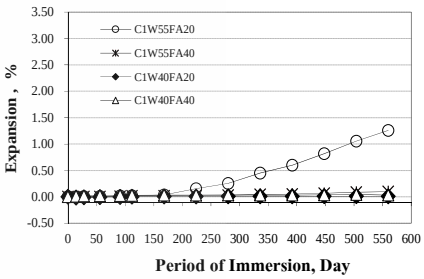
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



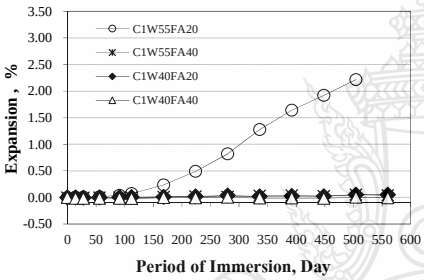
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



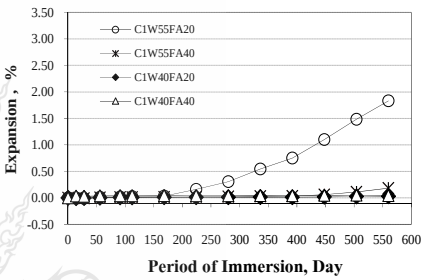
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



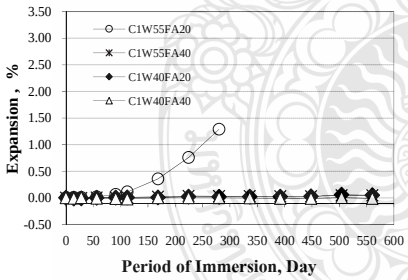
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



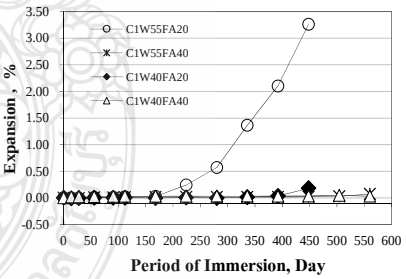
(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



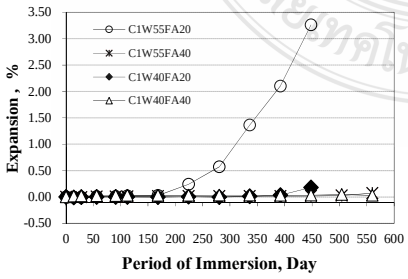
(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



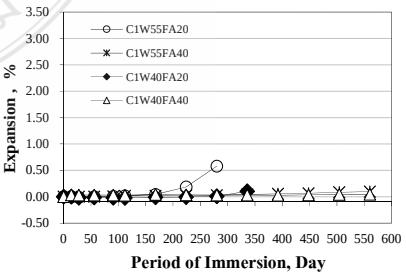
(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15



(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

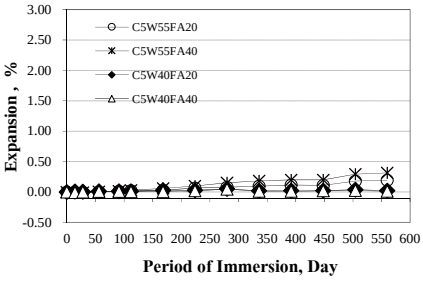


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

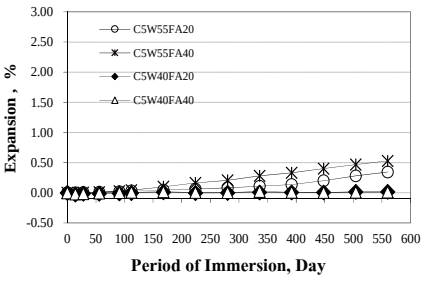


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

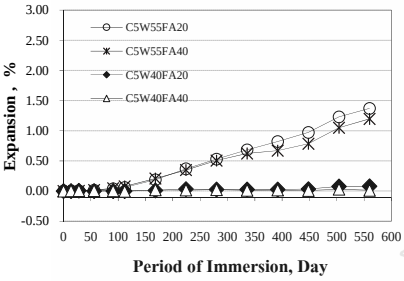
ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55



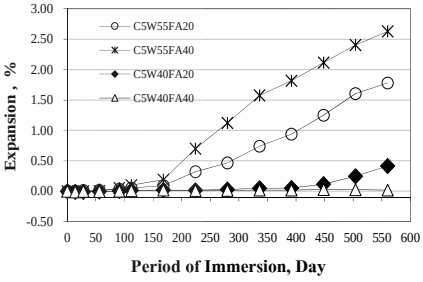
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



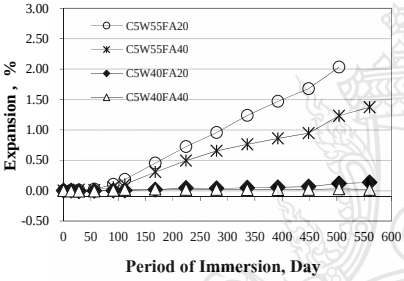
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



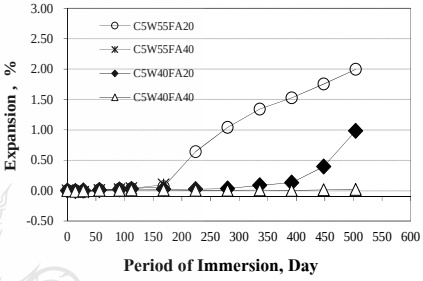
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



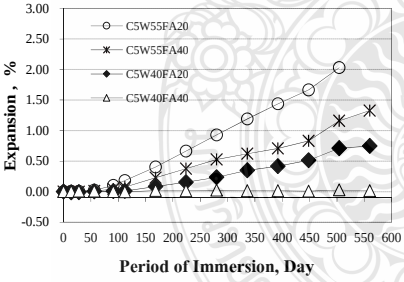
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



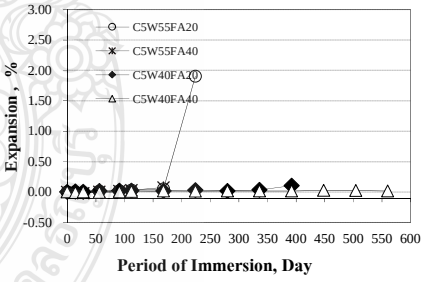
(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



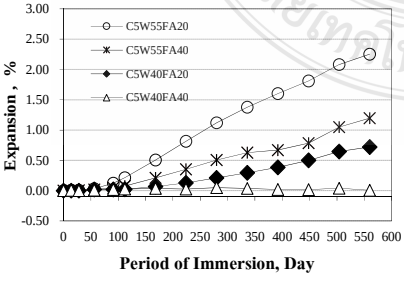
(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



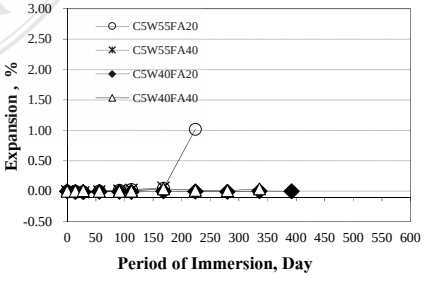
(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15



(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

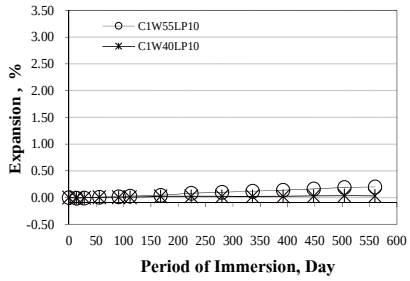


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

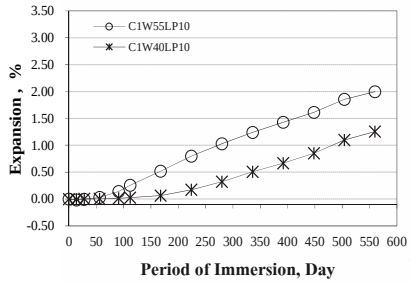


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

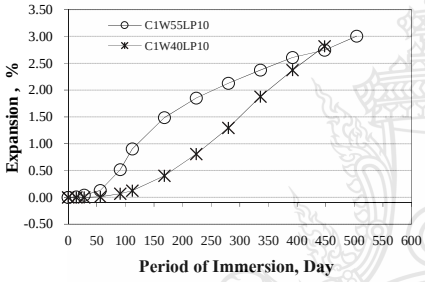
ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55



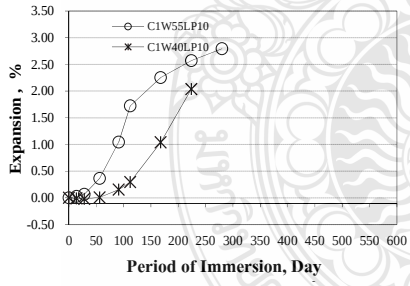
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



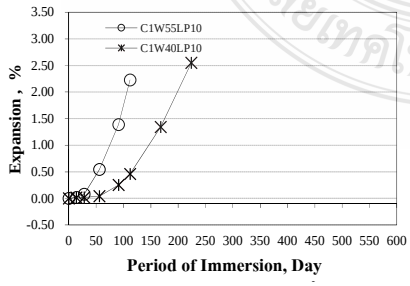
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



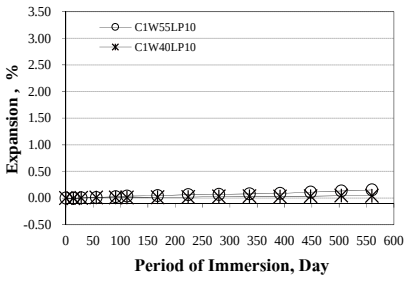
(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



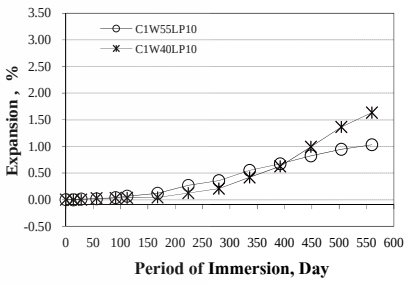
(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15



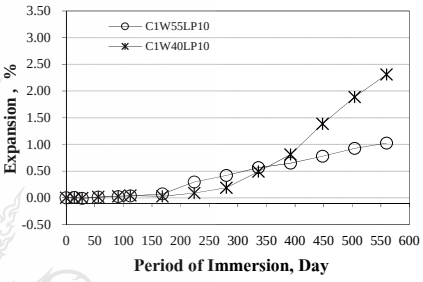
(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20



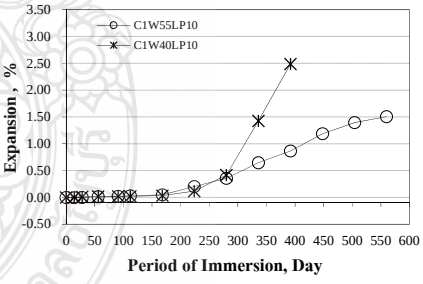
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



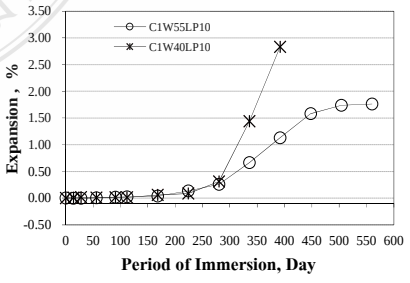
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

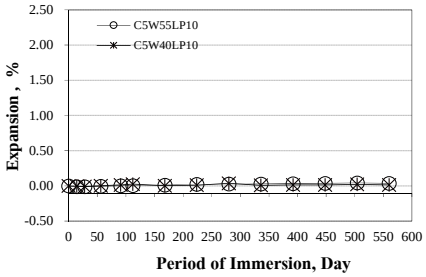


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

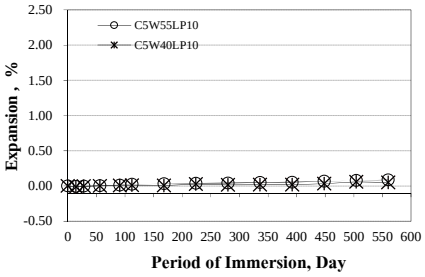


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

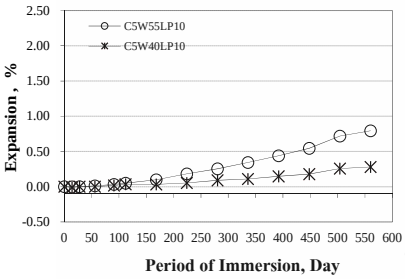
ภาพที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55



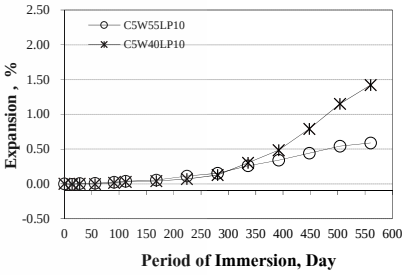
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



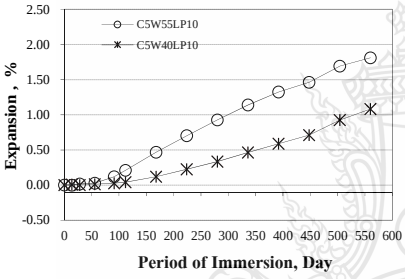
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



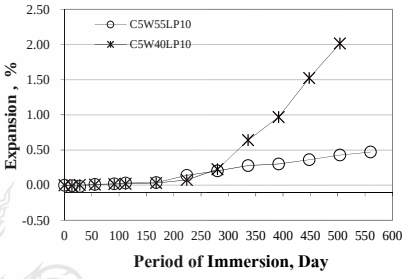
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



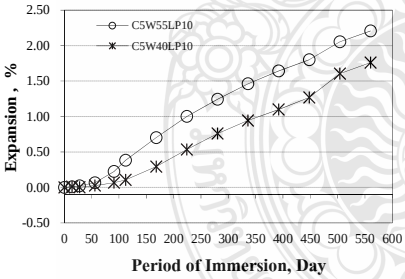
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



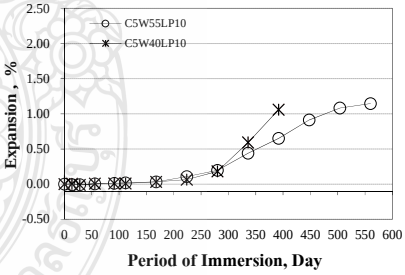
(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



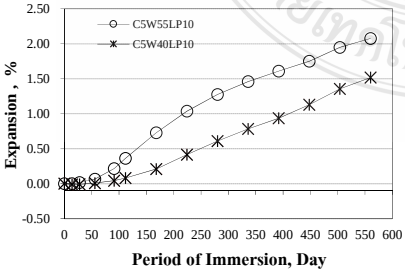
(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



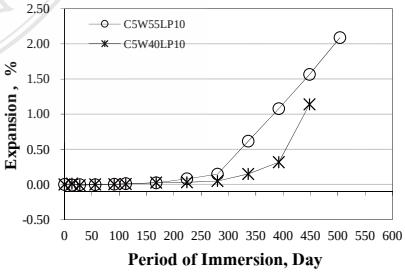
(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15



(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

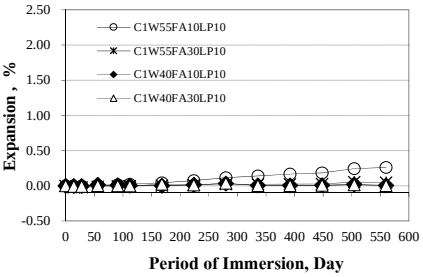


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

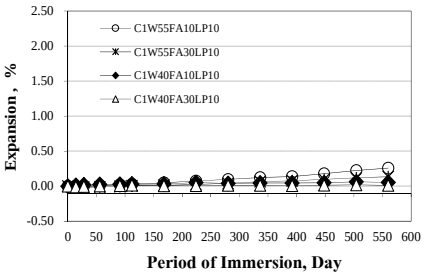


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

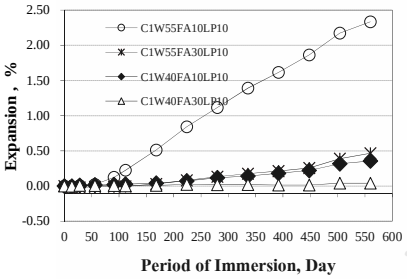
ภาพที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55



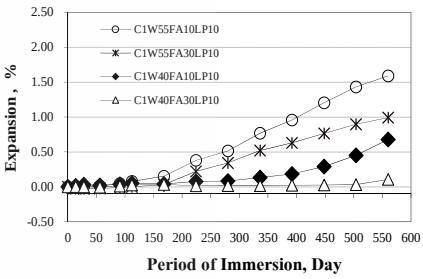
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



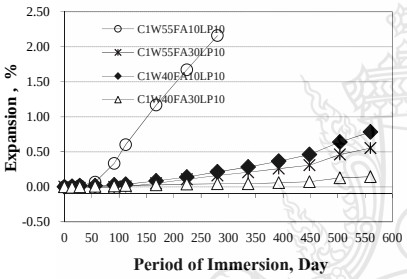
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



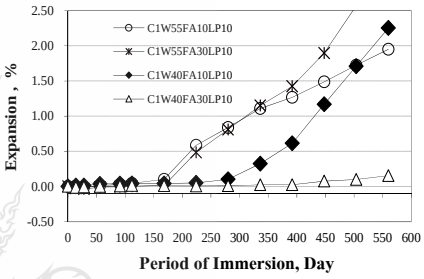
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



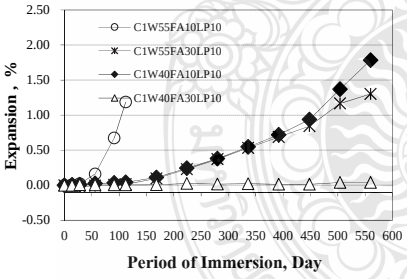
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



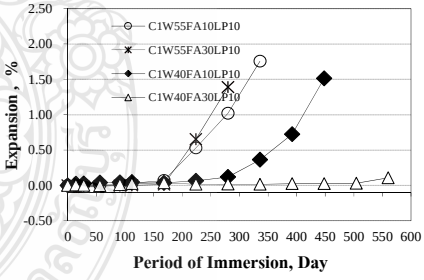
(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



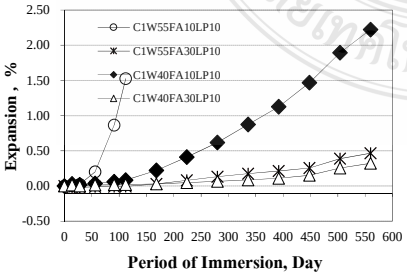
(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



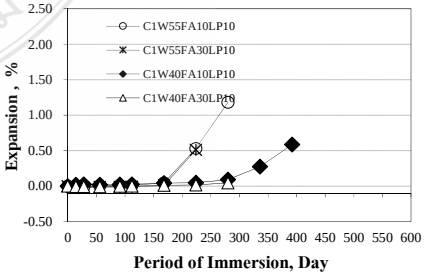
(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15



(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

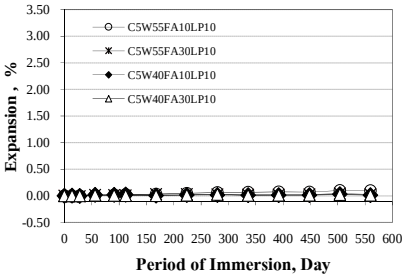


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

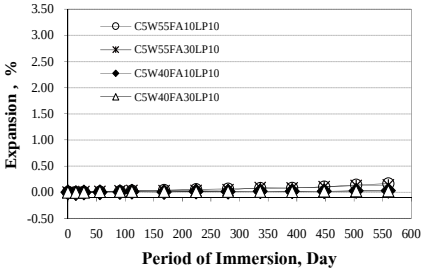


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

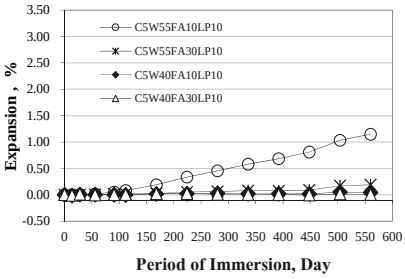
ภาพที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55



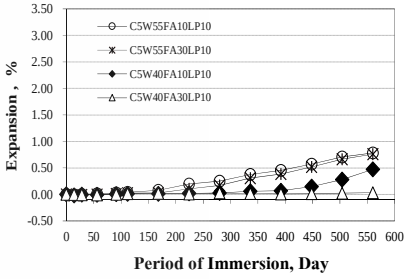
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



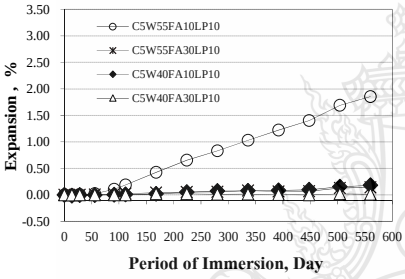
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



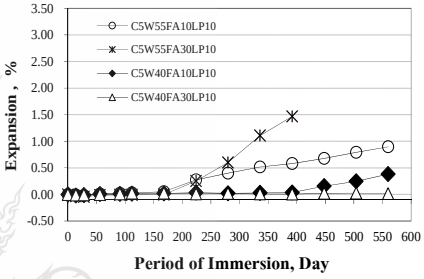
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



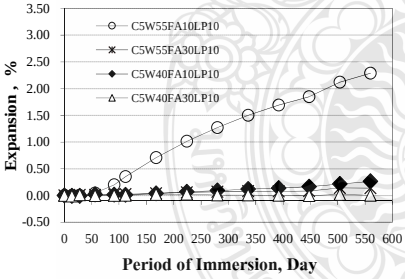
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



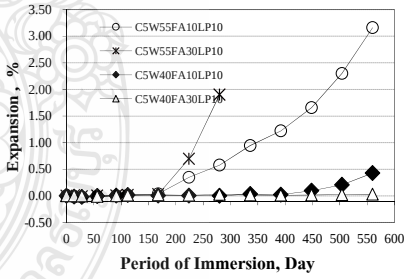
(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



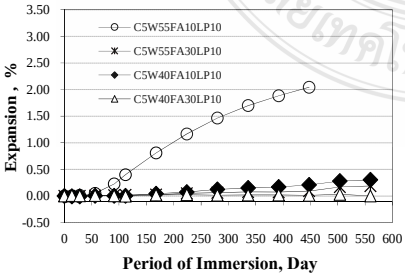
(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



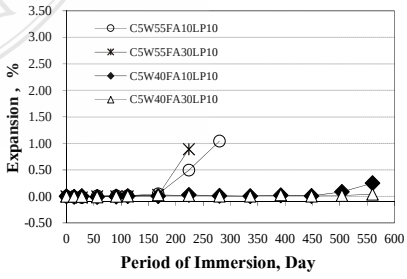
(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15



(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15



(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20



(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

ภาพที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55

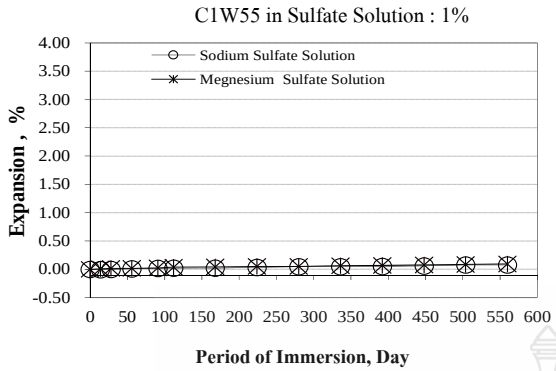
4.2.1.3 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์

ในการศึกษาเรื่องการทำลายโดยซัลเฟต สามารถทำได้โดยการนำตัวอย่างมอร์ต้าร์ไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต หรือ แคลเซียมซัลเฟต แต่เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก [1, 6, 10, 12] ดังนั้นสารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้สารละลายซัลเฟต 2 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ในการประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยการวัดการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ จึงได้พิจารณาถึงผลกระทบของชนิดของสารละลายซัลเฟตทั้ง 2 กรณี ที่มีต่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต โดยมีรายละเอียดดังนี้

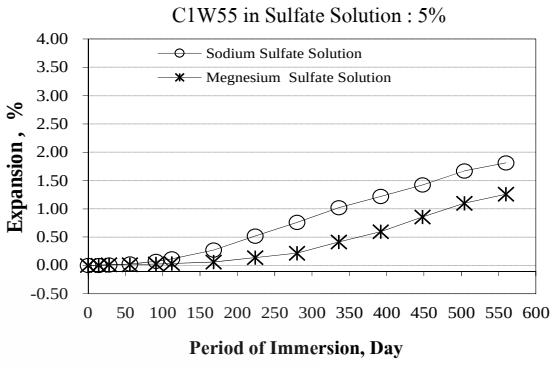
1. เมื่อพิจารณาในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน

ภาพที่ 4.40, 4.41, 4.42 และภาพที่ 4.43 แสดงผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน โดยภาพที่ 4.40 และภาพที่ 4.41 แสดงการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่ามากกว่าในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ทั้งนี้เป็นเพราะกลไกการทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะทำให้เกิด Ettringite ซึ่งมีคุณสมบัติในการขยายตัว ส่วนกลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น จะทำให้ไม่มีความเสถียรภาพภายในโครงสร้างของมอร์ต้าร์ โดยจะเปลี่ยนผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ให้เป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสานโดยจะทำให้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ยุ่ย มีการหลุดล่อนของผิวหรือโครงสร้างของตัวอย่าง มีการสูญเสียน้ำหนัก จึงทำให้ชิ้นตัวอย่างมีการขยายตัวที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

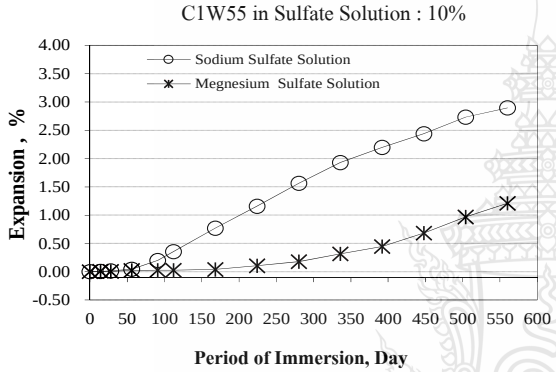
เมื่อพิจารณาการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน (ภาพที่ 4.42 และภาพที่ 4.43) ในสารละลายซัลเฟตทั้ง 2 ชนิด ทำให้ผลมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับกรณีของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน



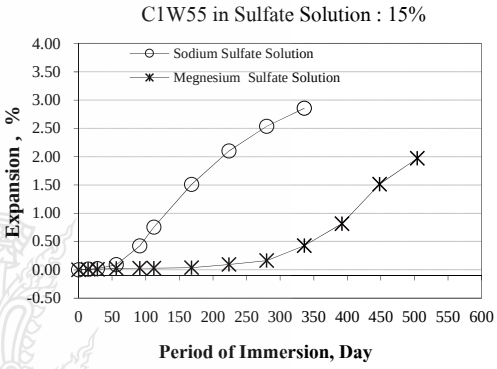
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



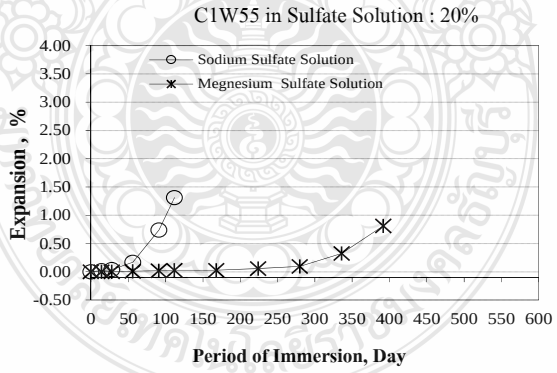
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

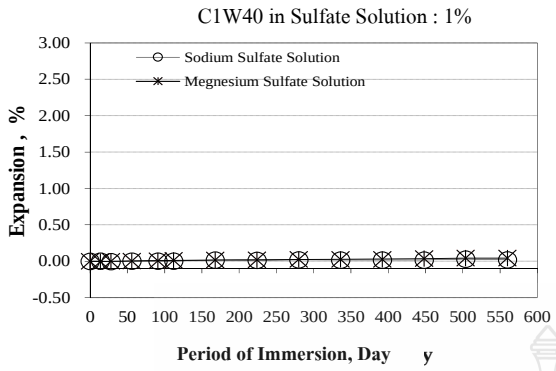


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

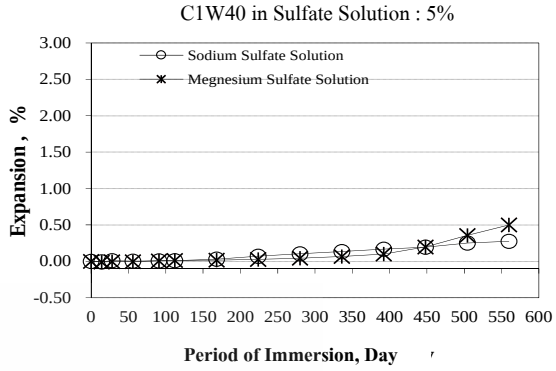


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

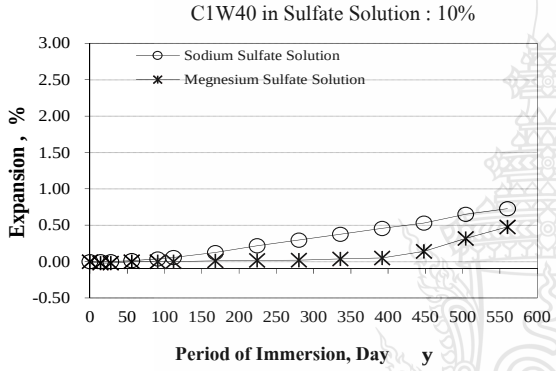
ภาพที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



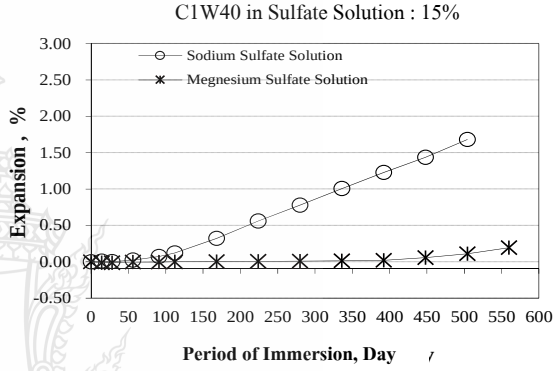
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



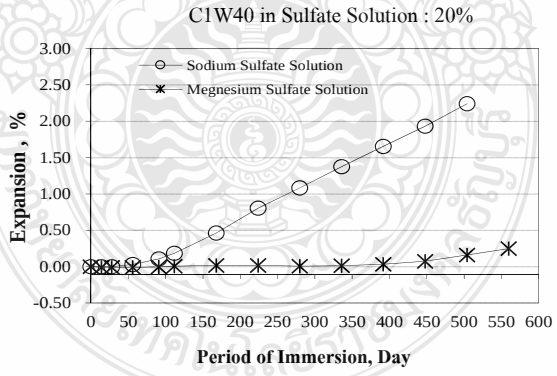
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

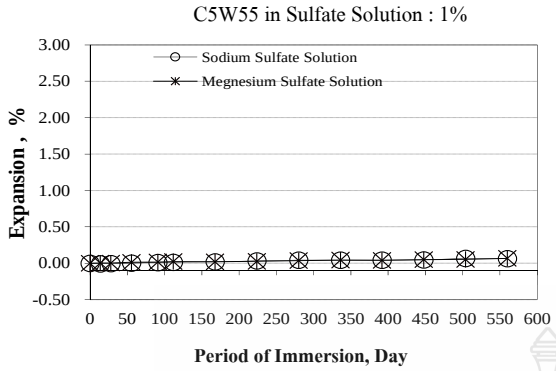


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

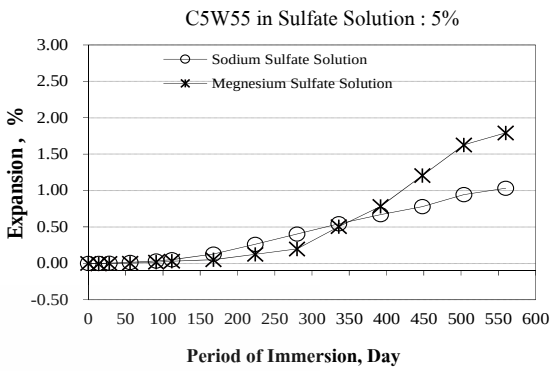


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

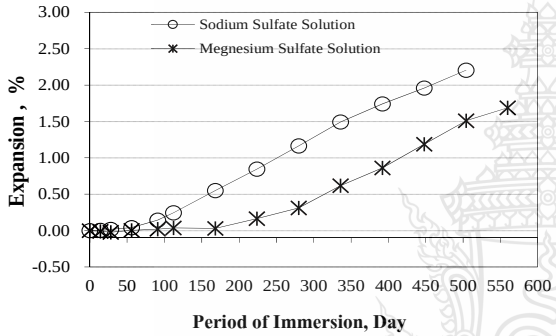
ภาพที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



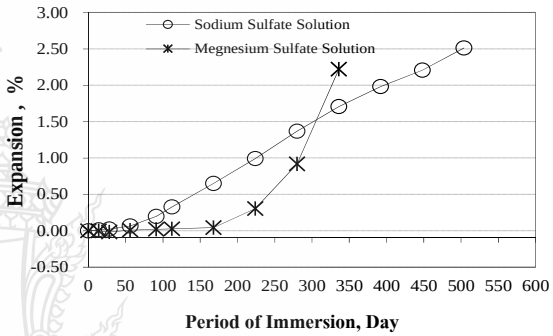
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



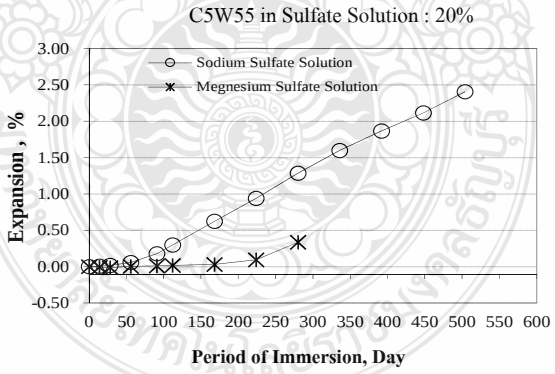
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

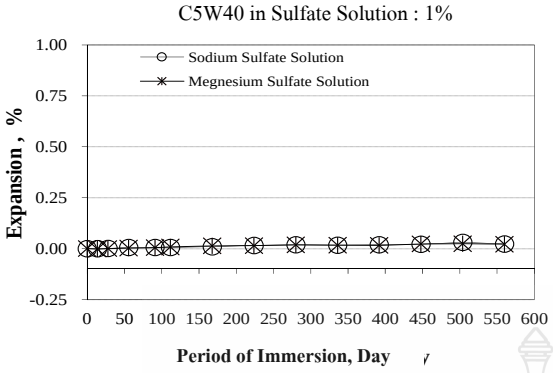


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

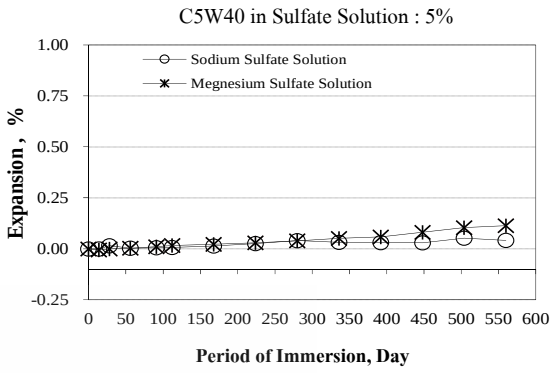


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

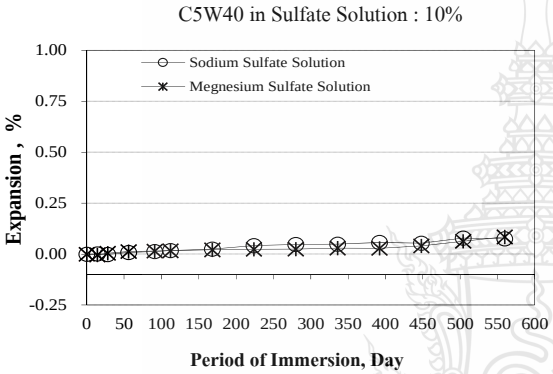
ภาพที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



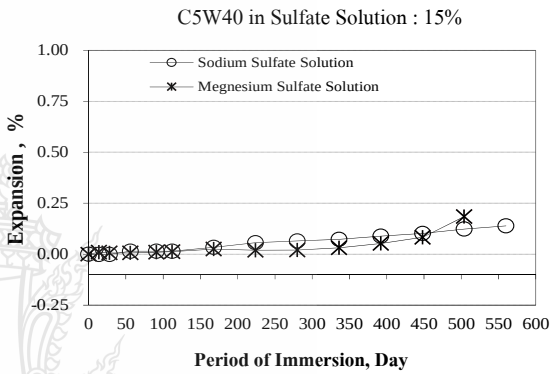
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



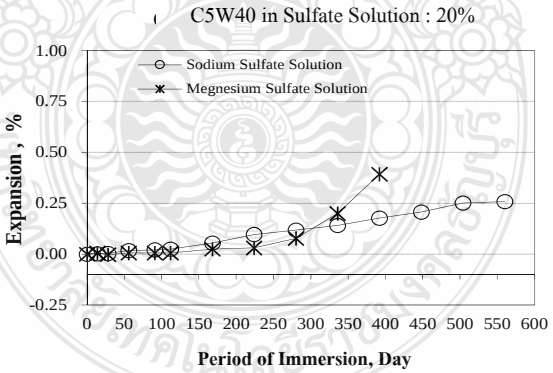
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

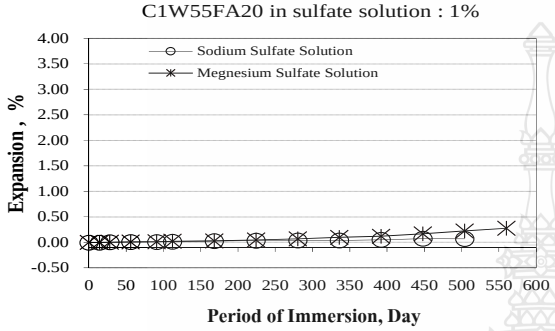


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

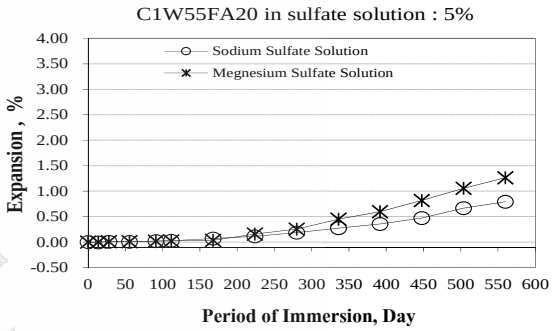
ภาพที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

2. เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

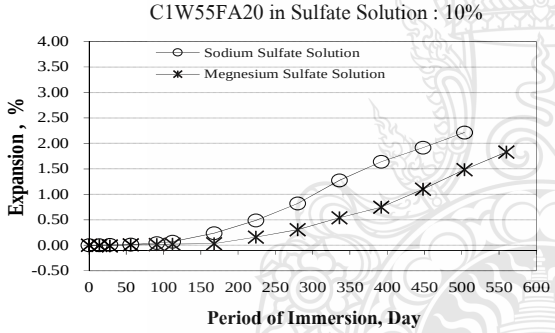
ภาพที่ 4.44 ถึงภาพที่ 4.51 แสดงถึงผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟต ต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 20 และร้อยละ 40 พบว่าชนิดของสารละลายซัลเฟตมีผลกระทบต่อการขยายตัวของตัวอย่างน้อยมาก ทั้งนี้เป็นเพราะการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตทั้ง 2 ชนิด มีค่าน้อยมาก จึงทำให้การขยายตัวมีค่าไม่ค่อยแตกต่างกัน



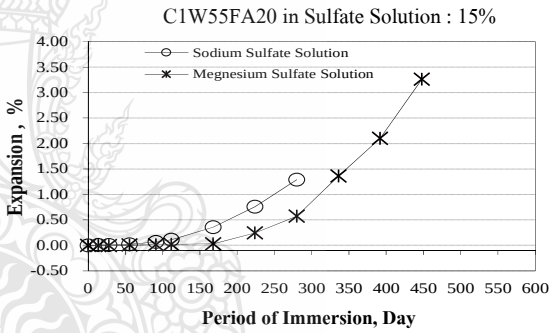
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



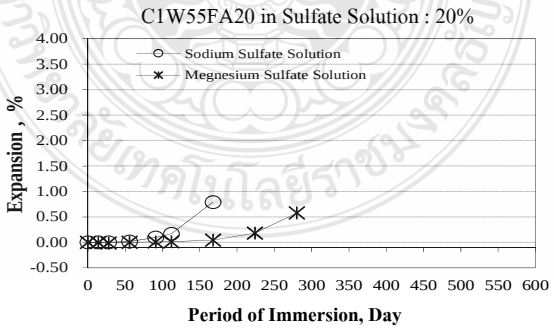
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

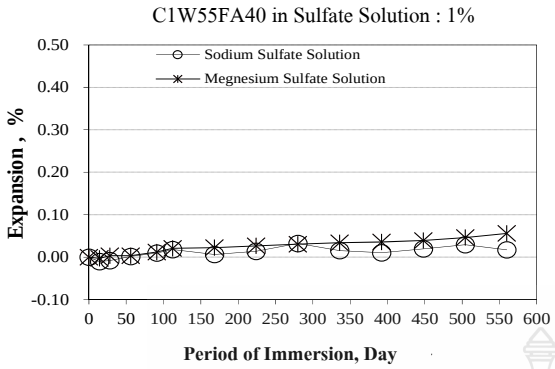


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

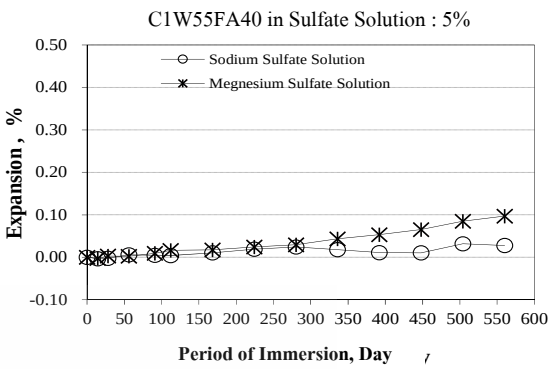


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

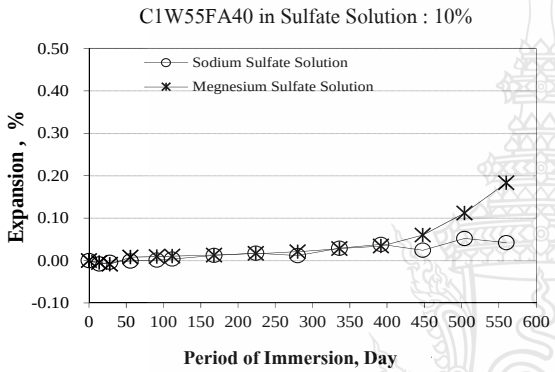
ภาพที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 20 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



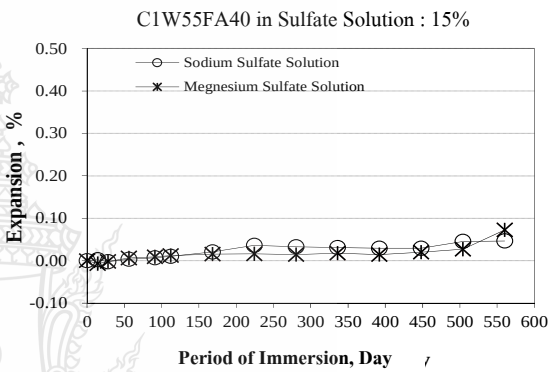
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



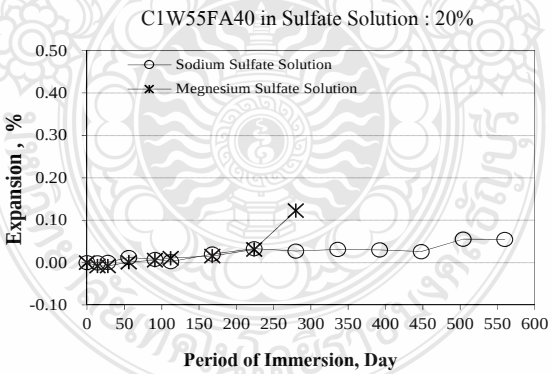
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

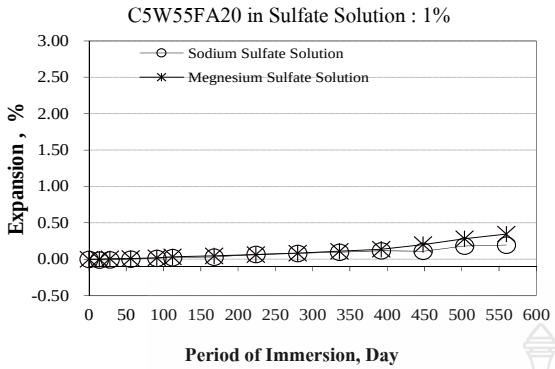


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

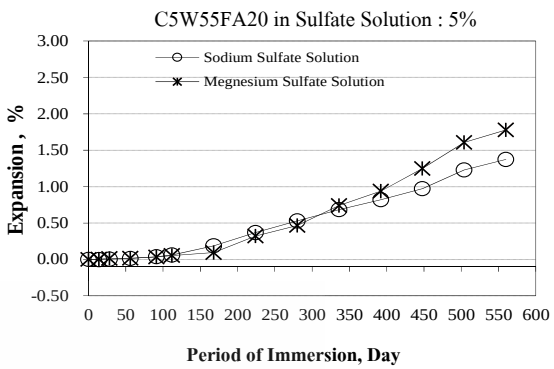


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

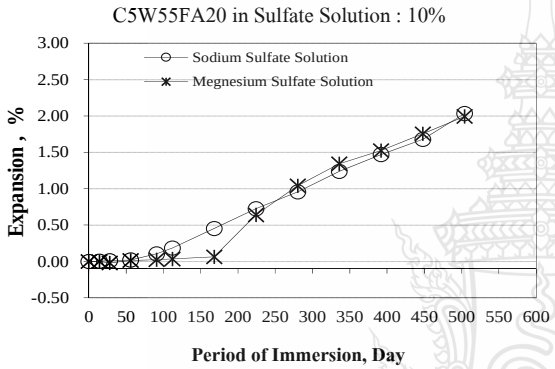
ภาพที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



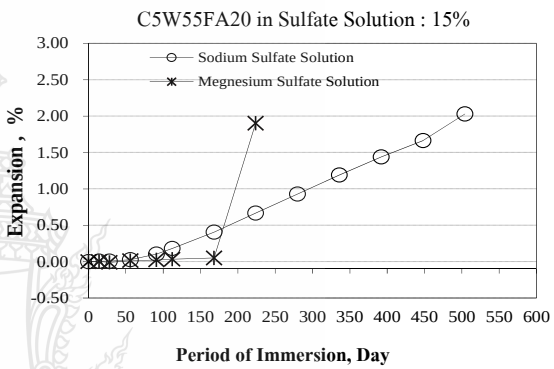
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



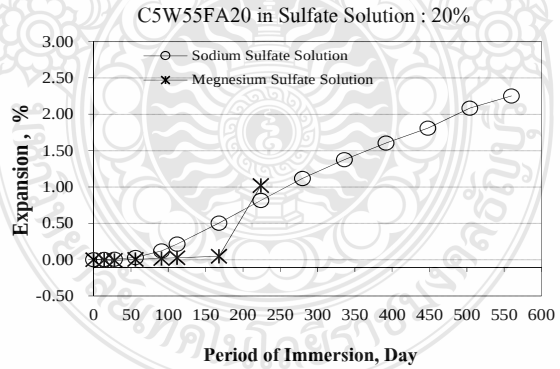
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

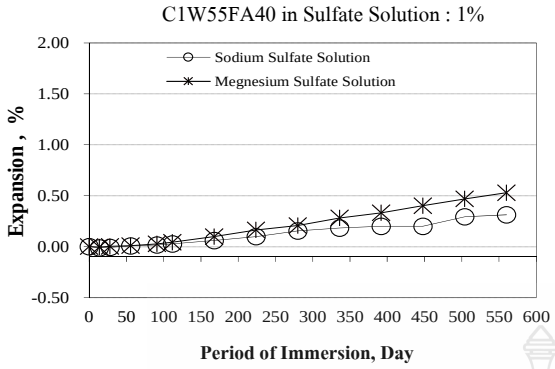


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

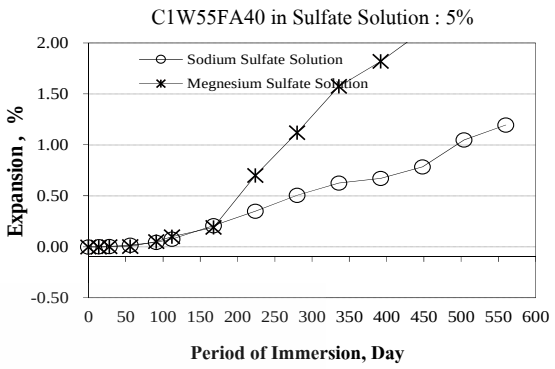


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

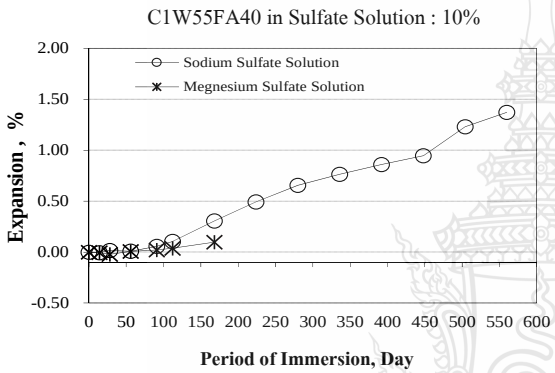
ภาพที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 20 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



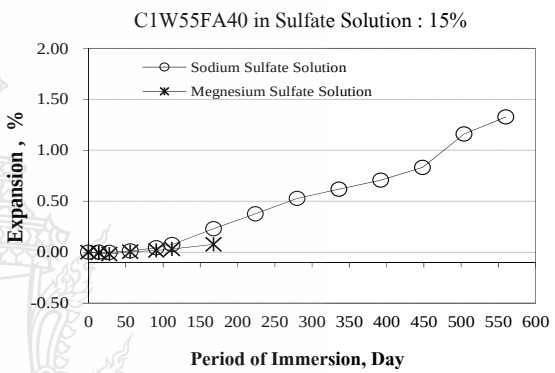
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



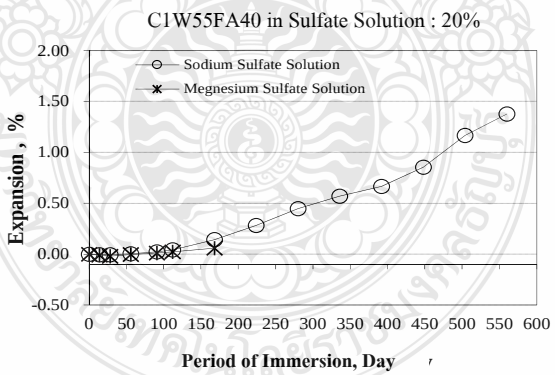
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

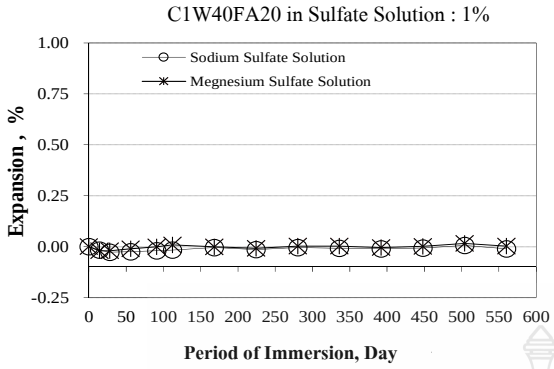


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

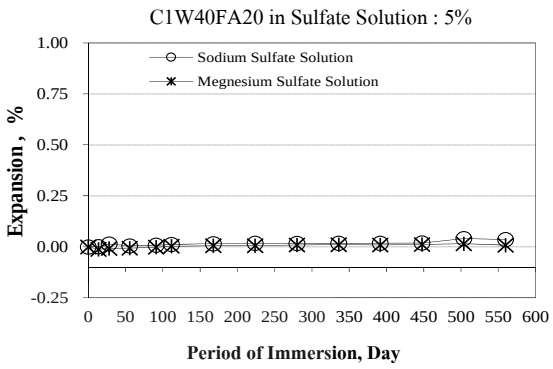


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

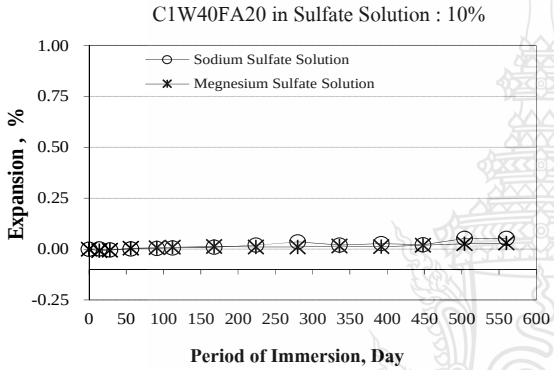
ภาพที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



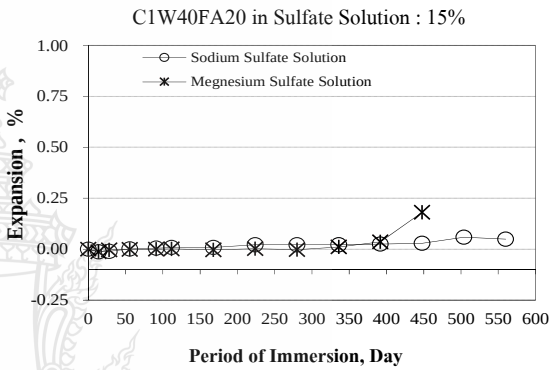
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



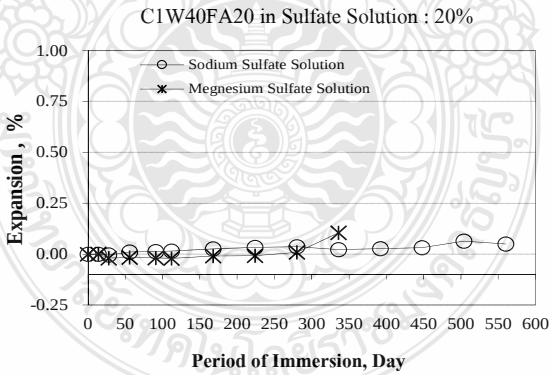
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

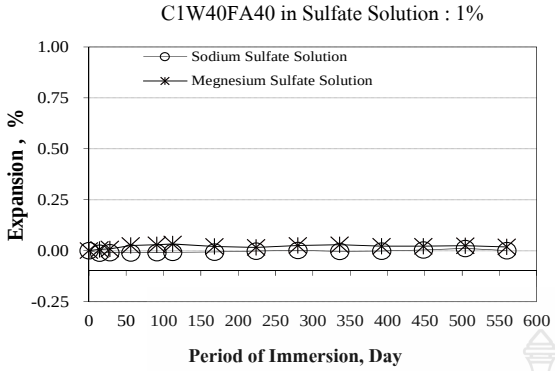


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

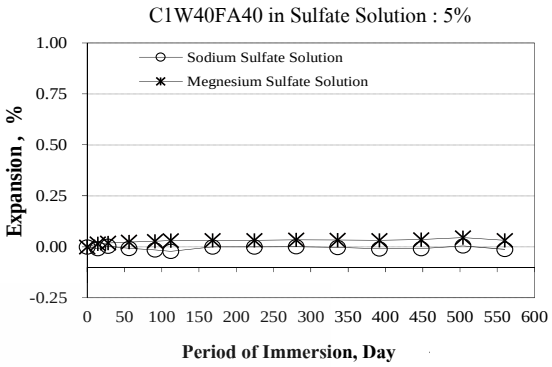


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

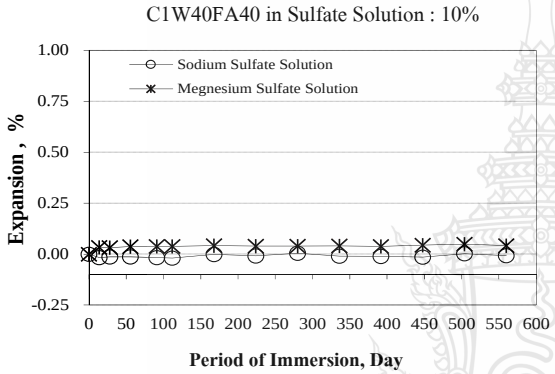
ภาพที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 20 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



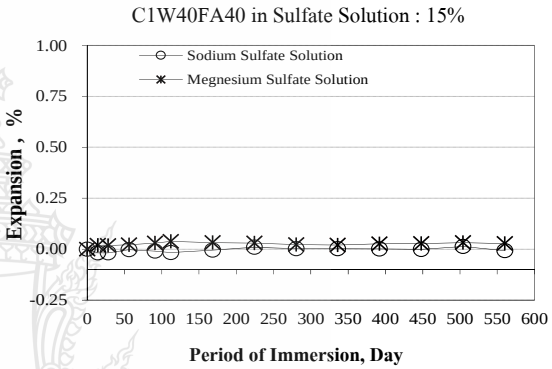
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



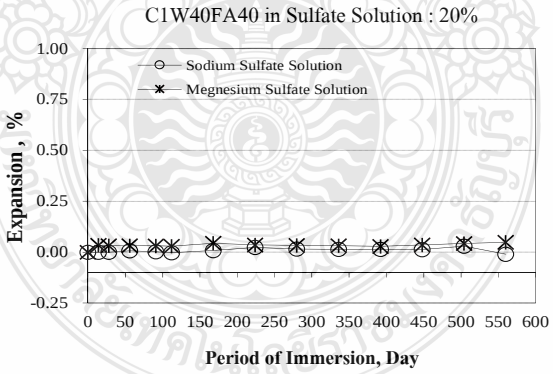
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 15

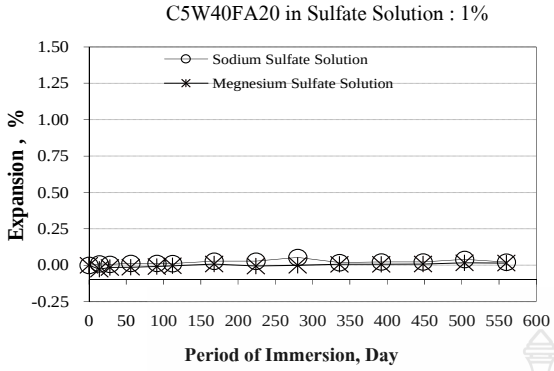


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

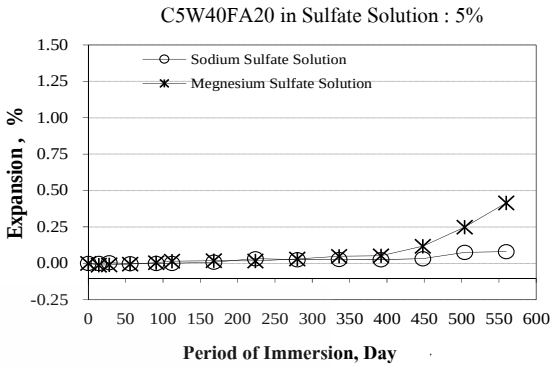


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

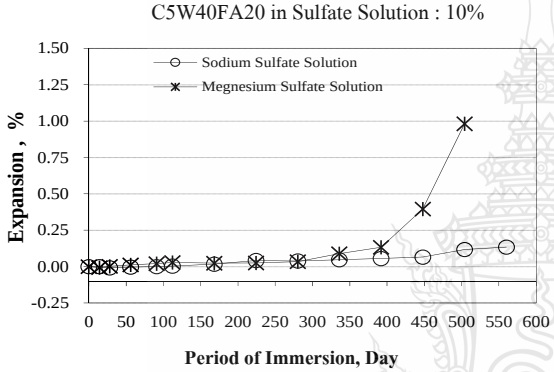
ภาพที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



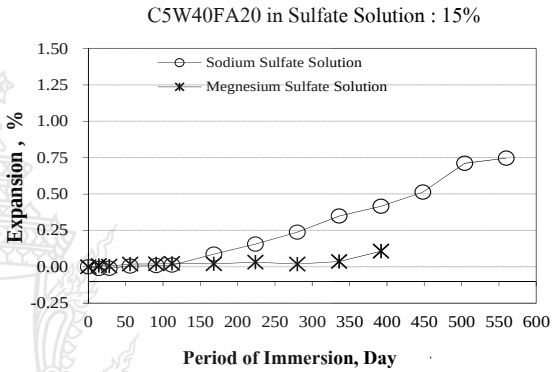
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



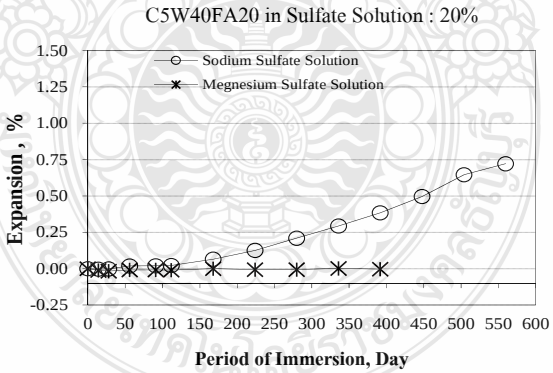
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

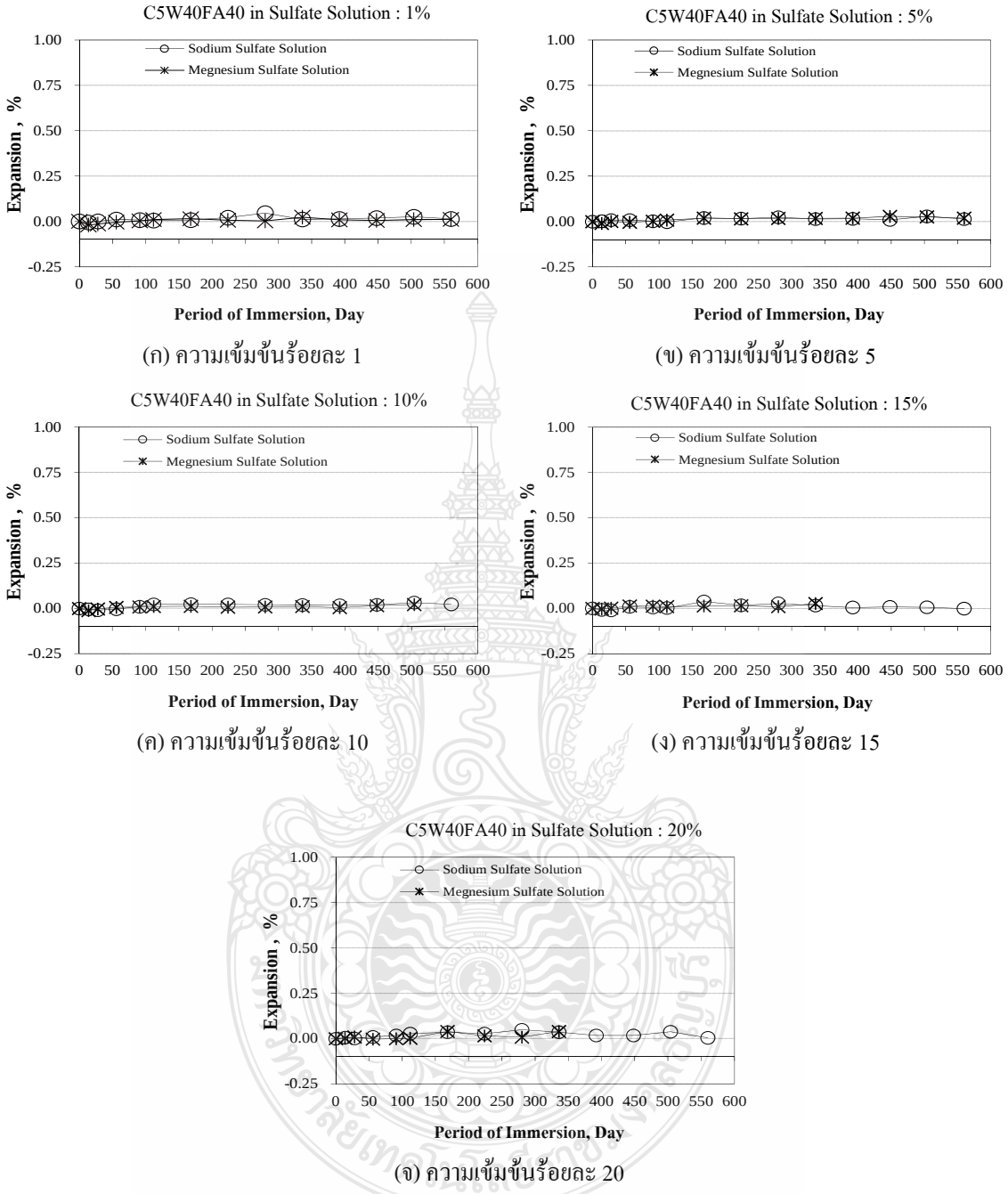


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15



(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

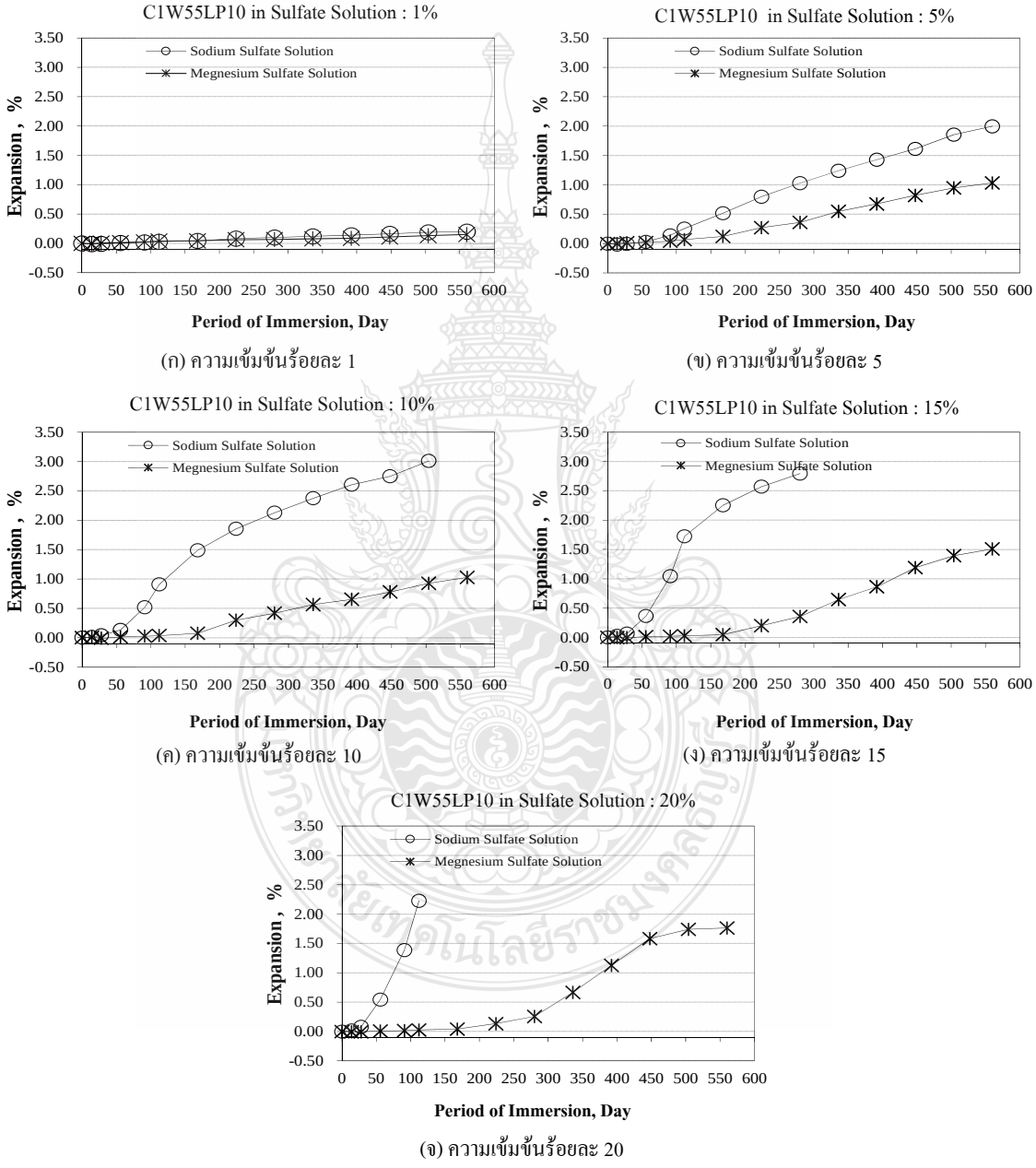
ภาพที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 20 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



ภาพที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

3. เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.52 ภาพที่ 4.53 ภาพที่ 4.54 และภาพที่ 4.55 แสดงถึงผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตทั้งสองมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก



(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1

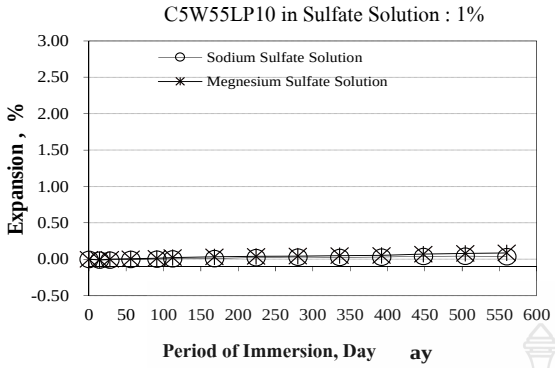
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5

(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

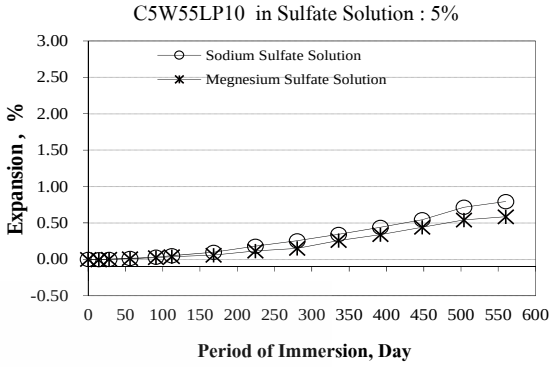
(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

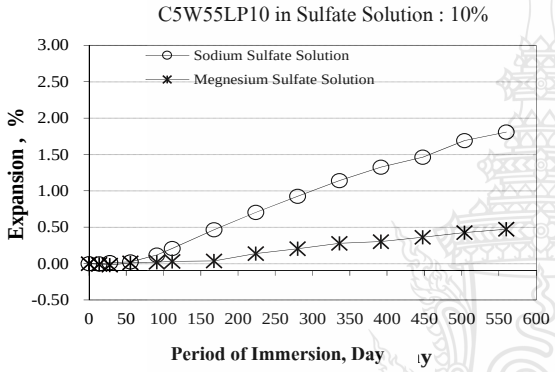
ภาพที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



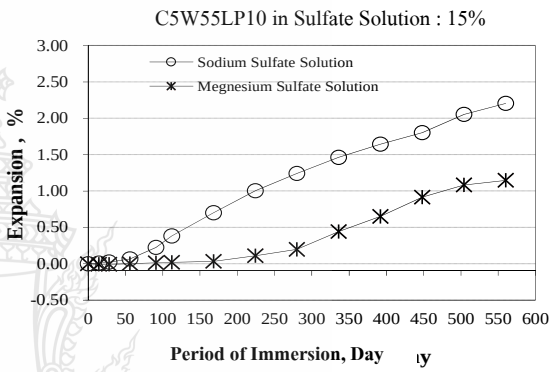
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



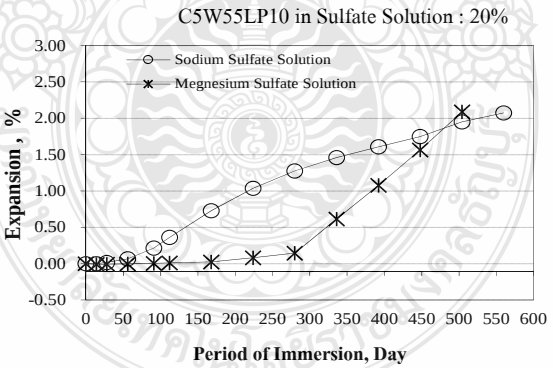
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

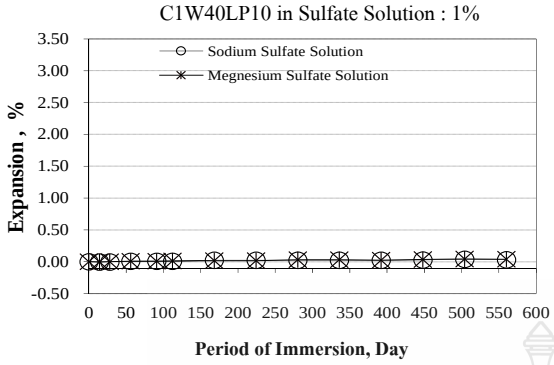


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

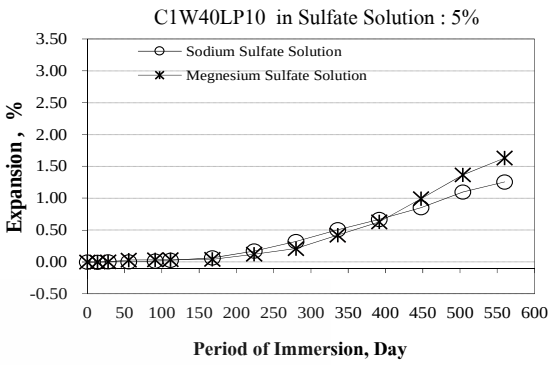


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

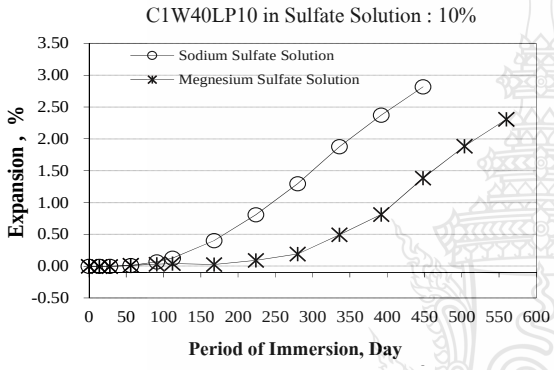
ภาพที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



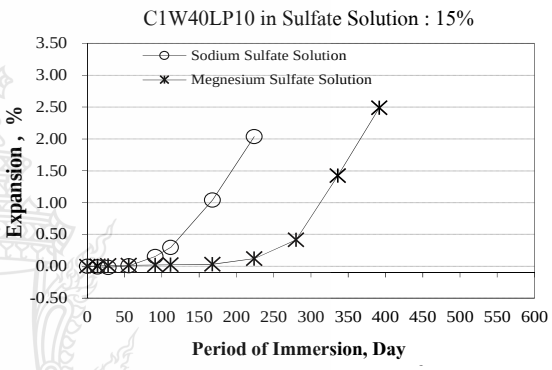
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



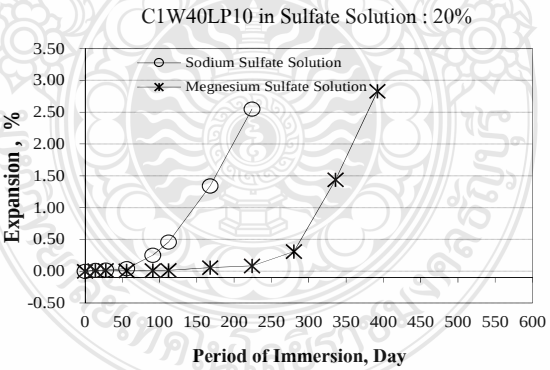
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

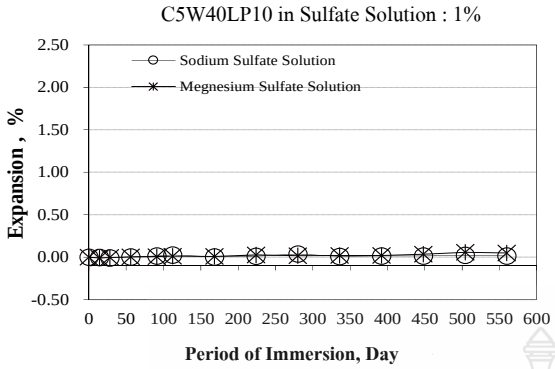


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

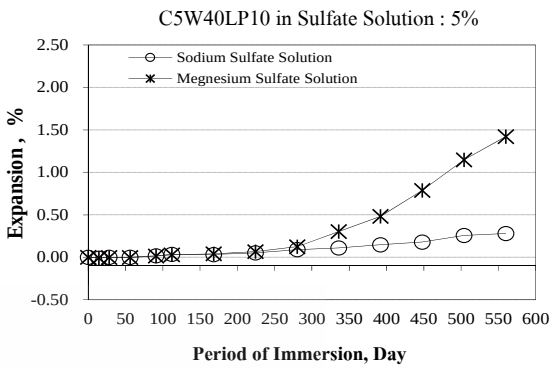


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

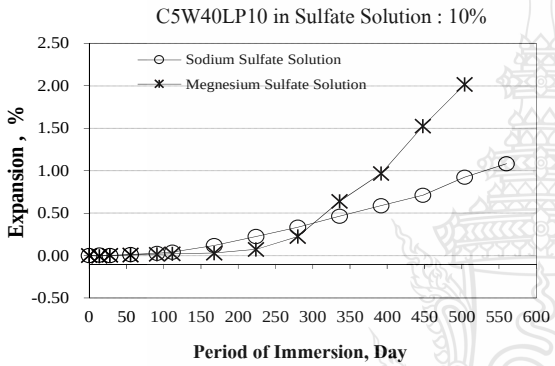
ภาพที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



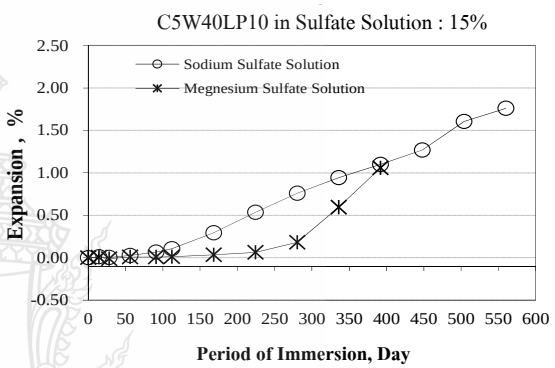
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



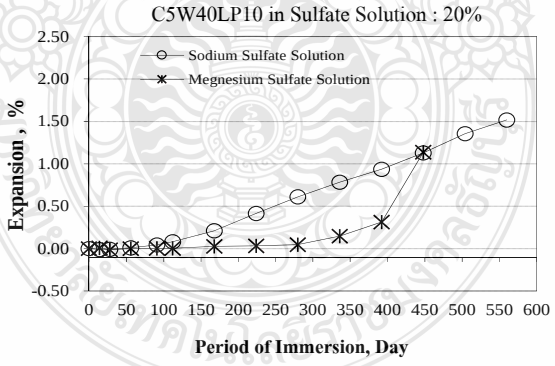
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15



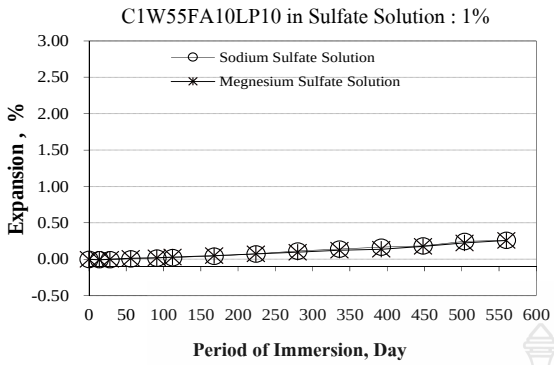
(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

ภาพที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

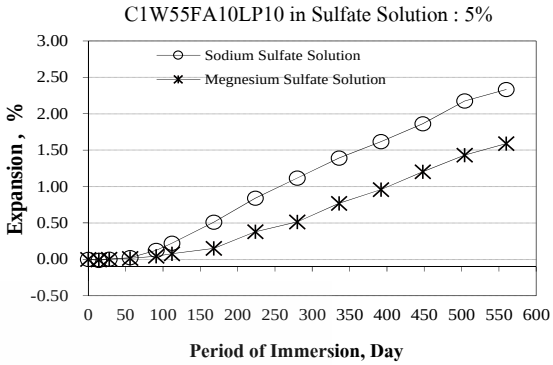
4. เมื่อแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.56 ภาพที่ 4.57 ภาพที่ 4.58 และภาพที่ 4.59 แสดงถึงผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูนร่วมกับเถ้าลอย โดยที่สัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ C1W55FA10LP10 (ภาพที่ 4.56) การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่ามากกว่าการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ส่วนสัดส่วนผสม C1W55FA30LP10 (ภาพที่ 4.57) การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่ามากกว่าโซเดียมซัลเฟต และสำหรับสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ C1W40FA10LP10 และ C1W40FA30LP10 (ภาพที่ 4.58 และภาพที่ 4.59) พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตทั้ง 2 ชนิด มีค่าไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นเพราะการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตทั้ง 2 ชนิด มีค่าน้อยมาก แสดงว่าชนิดของสารละลายซัลเฟตไม่มีผลกระทบต่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่าง

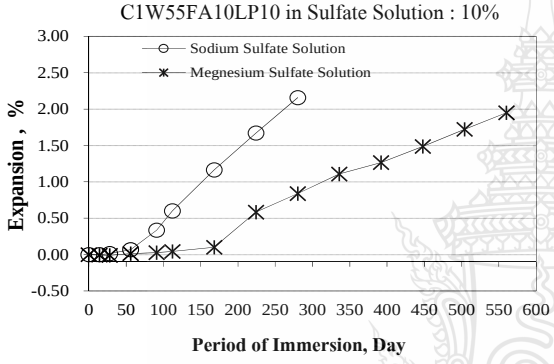
สำหรับผลกระทบของชนิดของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของกรณีตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร่วมกับเถ้าลอย จากภาพที่ 4.60 ภาพที่ 4.61 ภาพที่ 4.62 และภาพที่ 4.63 พบว่าแนวโน้มการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตทั้ง 2 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน หรือแทบจะไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นเพราะการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าค่อนข้างน้อย นั่นแสดงว่าผลของชนิดสารละลายซัลเฟตมีผลกระทบต่อการขยายตัวน้อยหรือไม่มีผลกระทบต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์นั่นเอง



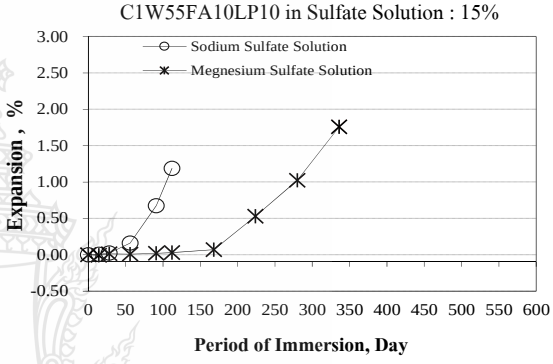
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



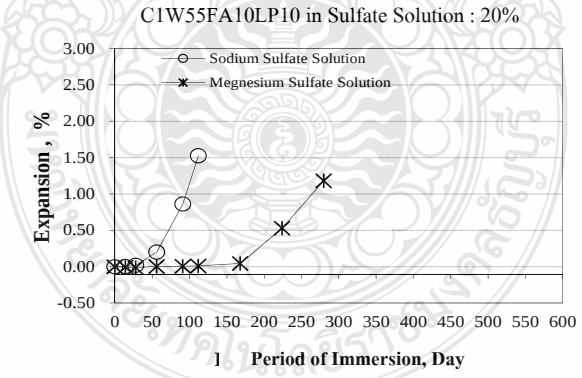
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

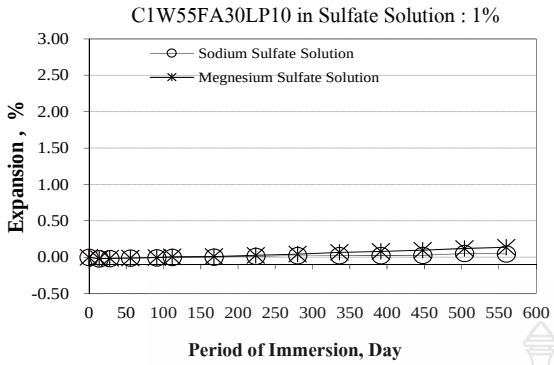


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

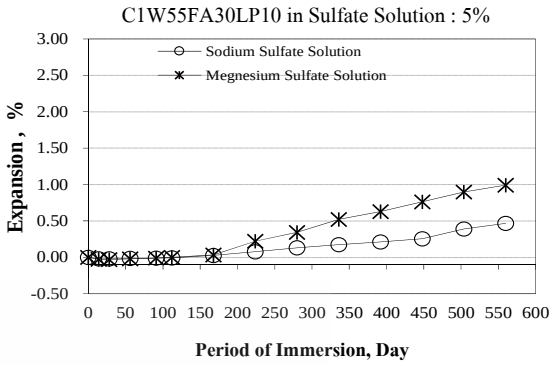


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

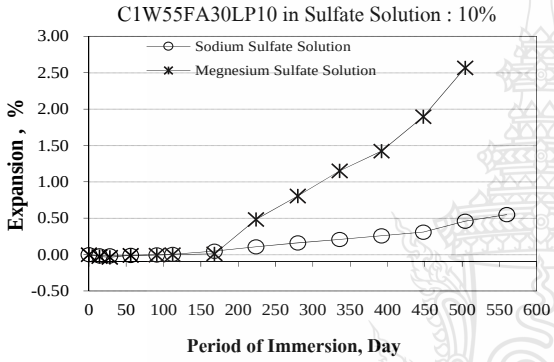
ภาพที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



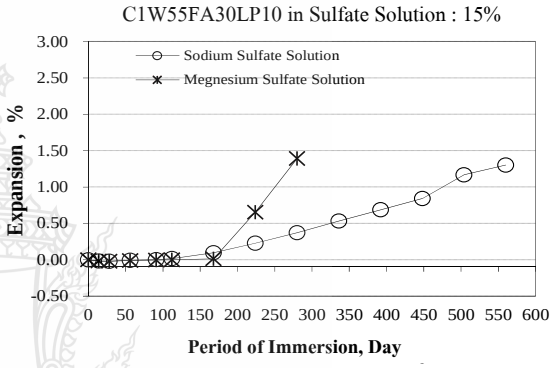
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



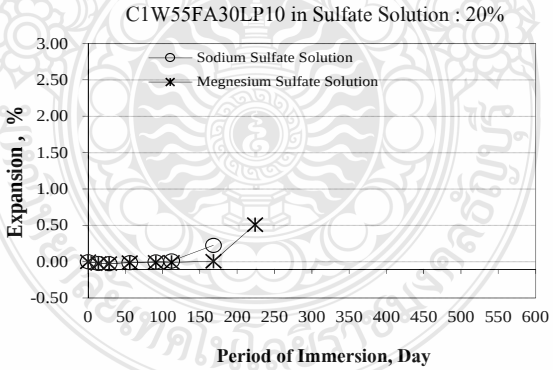
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

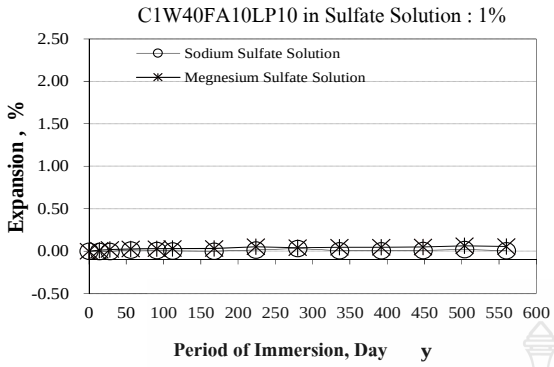


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

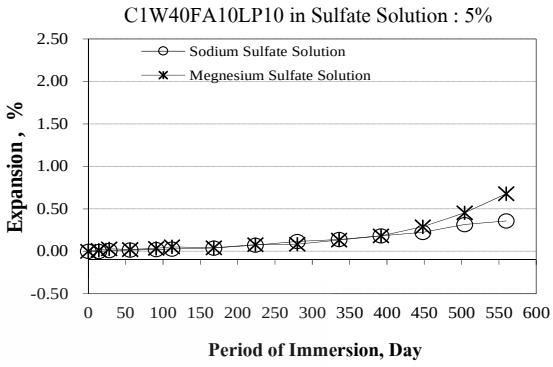


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

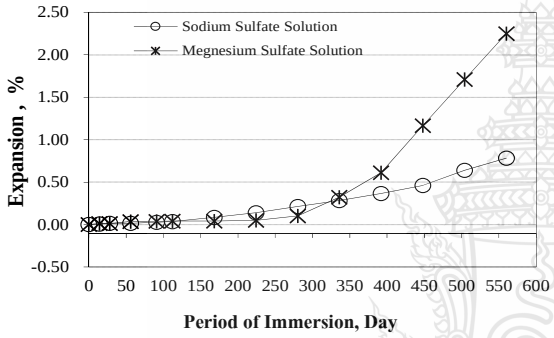
ภาพที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



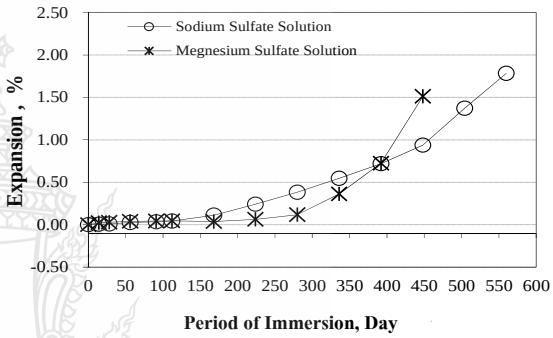
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



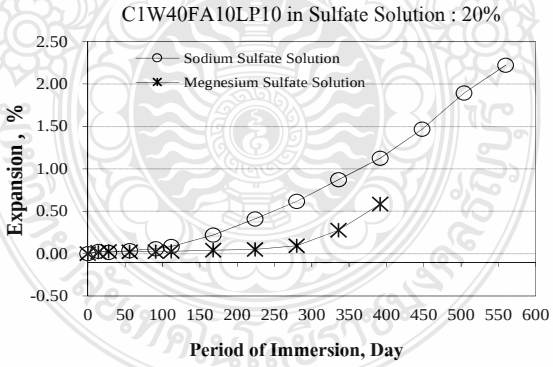
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

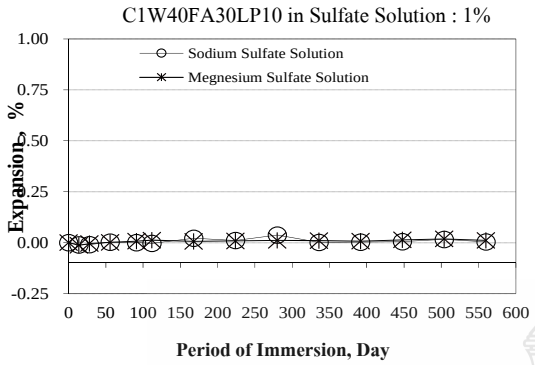


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

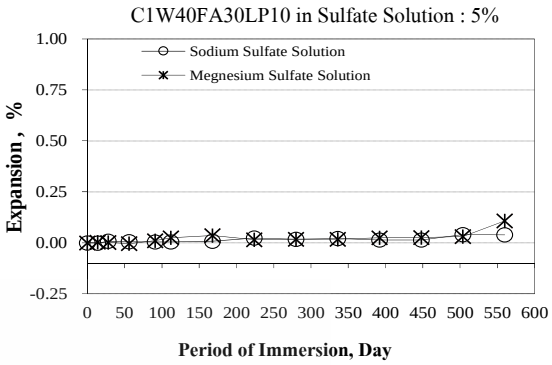


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

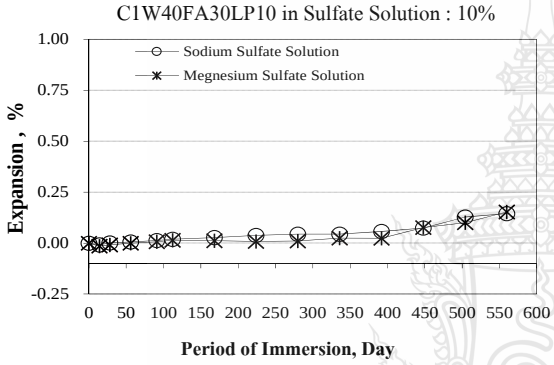
ภาพที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



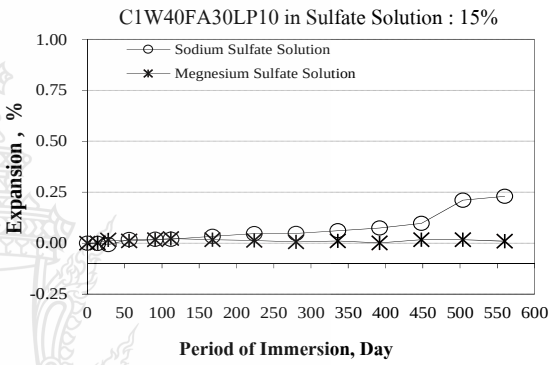
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



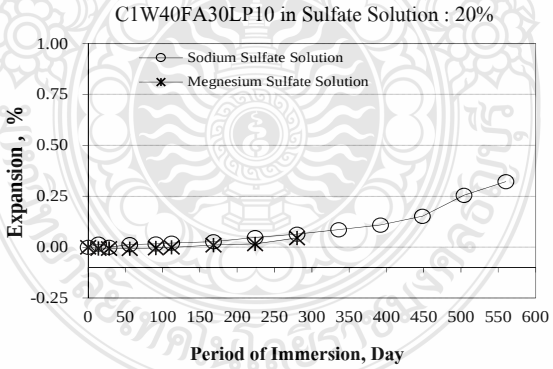
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

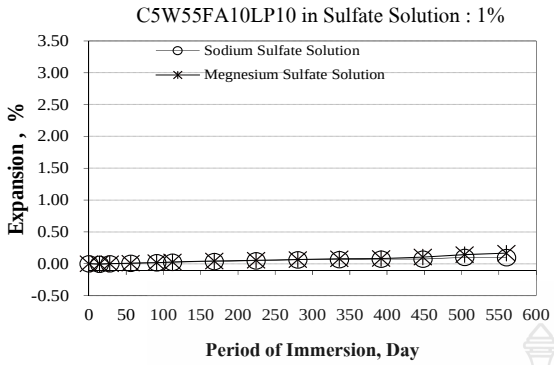


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

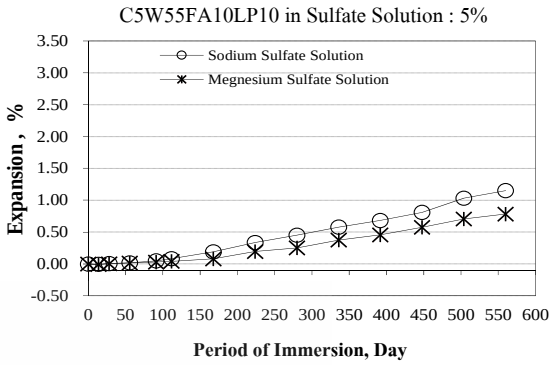


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

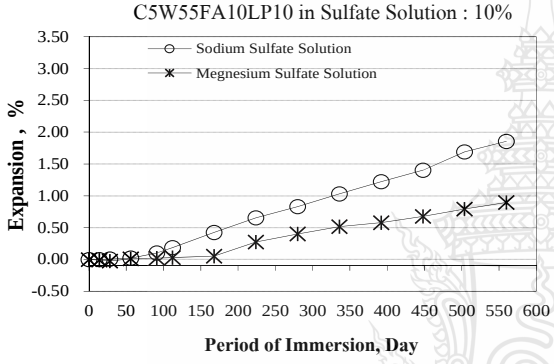
ภาพที่ 4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



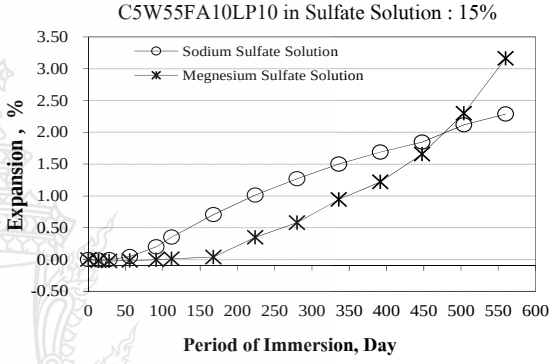
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



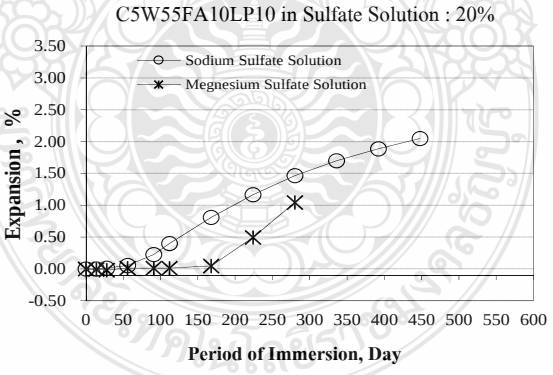
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

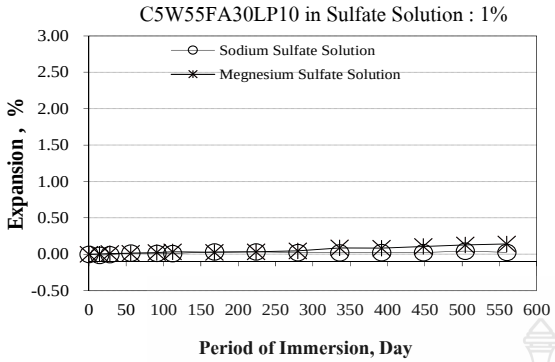


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

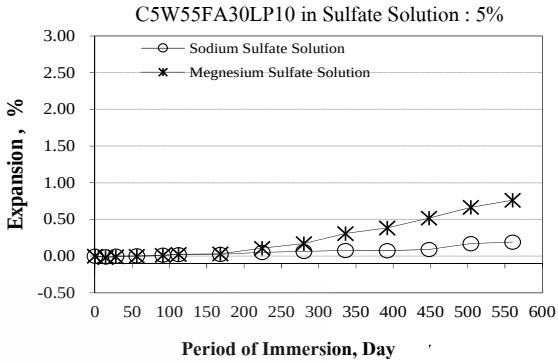


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

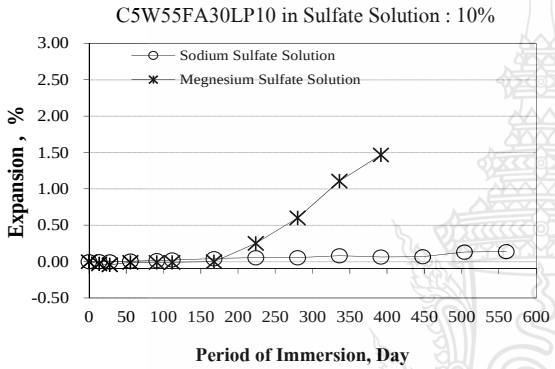
ภาพที่ 4.60 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



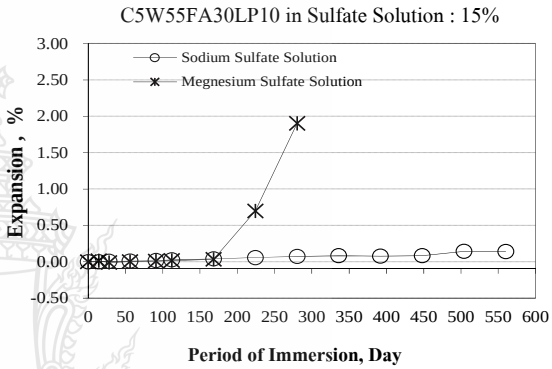
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



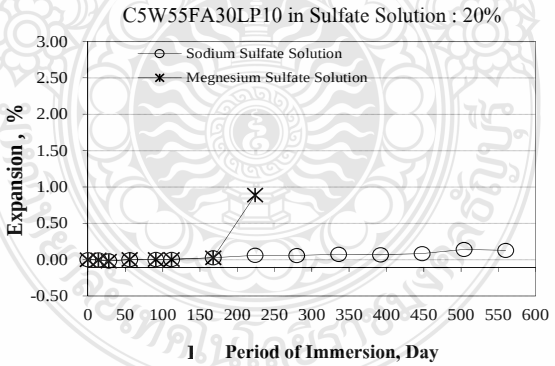
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

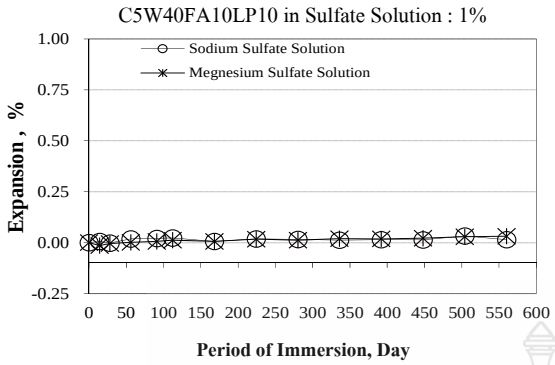


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 15

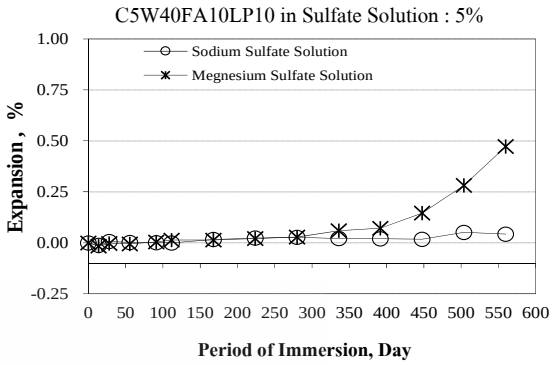


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

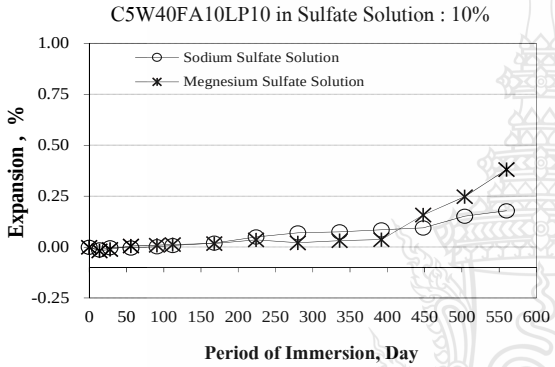
ภาพที่ 4.61 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



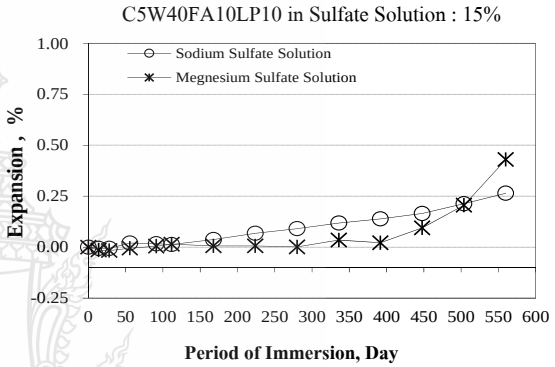
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



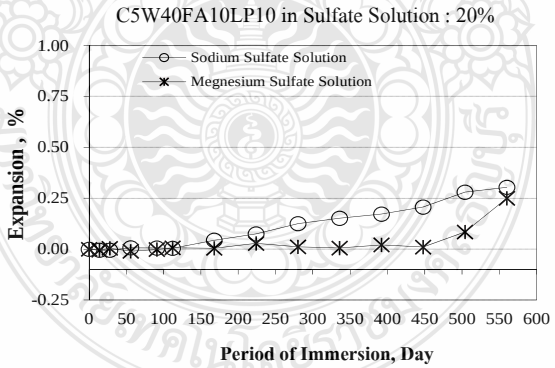
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

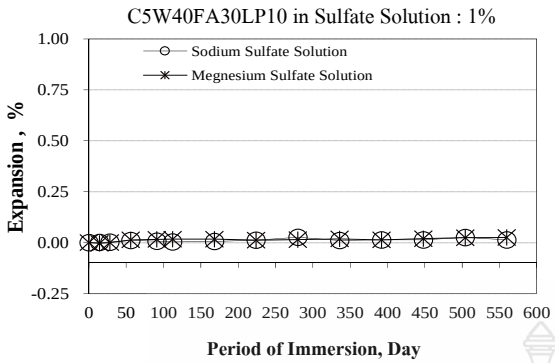


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

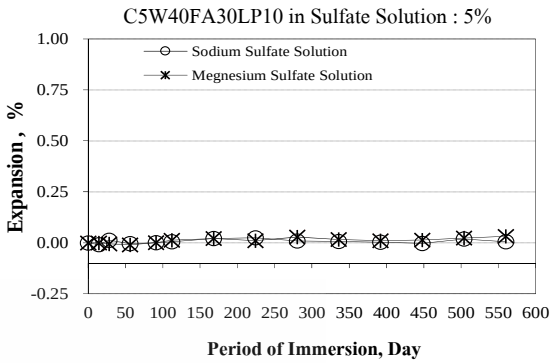


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

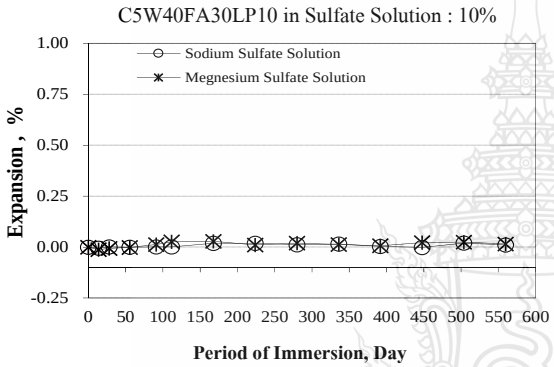
ภาพที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



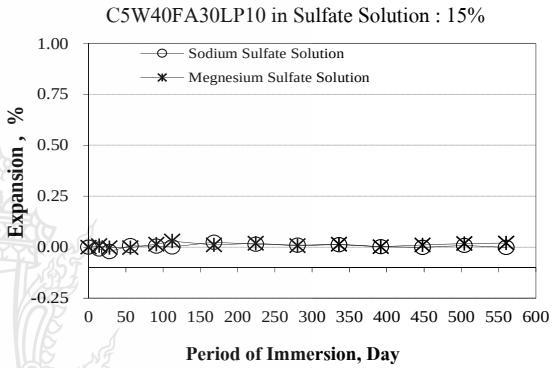
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



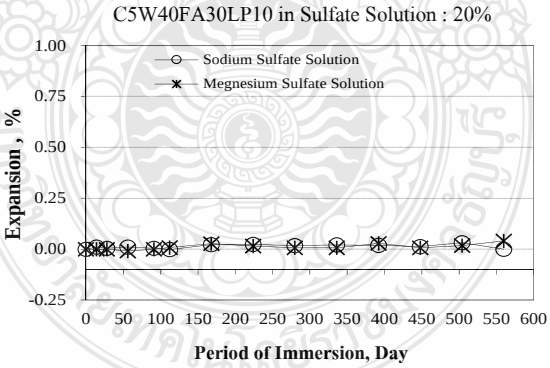
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15



(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

ภาพที่ 4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

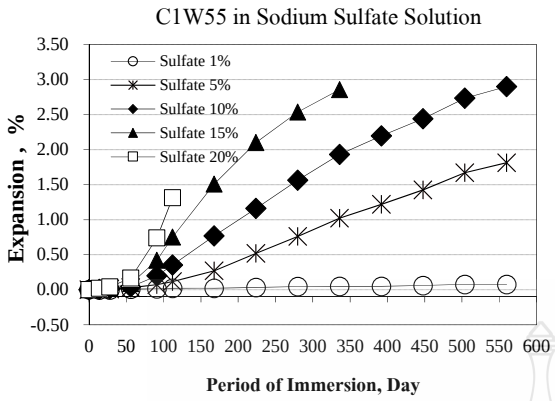
4.2.1.4 ผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์

สารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตที่แตกต่างกันคือ ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก หรือมีปริมาณอิออนซัลเฟต (SO_4^{2}) เท่ากับ 6760, 33800, 67600, 101400 และ 135200 ppm ตามลำดับ ดังนั้นในการปร ะเมินความต้านทานซัลเฟตโดยการวัดการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์นั้น จึงได้พิจารณาถึงผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตทั้ง 5 กรณี ที่มีต่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต โดยมีรายละเอียดดังนี้

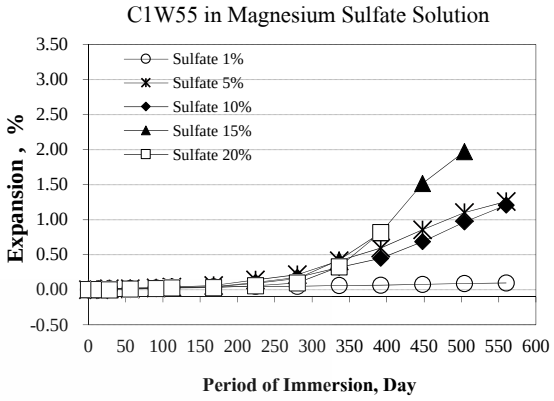
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ต่างความเข้มข้นกัน พบว่าแนวโน้มการขยายตัวทุกความเข้มข้นไปในทิศทางเดียวกัน และพบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มาก (0.55) เมื่อความเข้มข้นสูงมาก คือร้อยละ 10, 15 และ 20 นั้น ที่อายุการแช่ในสารละลายซัลเฟตยังไม่มากก็สามารถที่จะประเมินความต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างโดยวิธีวัดการขยายตัวได้ ซึ่งจะช่วยร่นระยะเวลาในการทดสอบเมื่อเทียบกับความเข้มข้น ร้อยละ 5 (ตามมาตรฐาน ASTM)

ภาพที่ 4.64 ถึงภาพที่ 4.87 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการขยายตัวและระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 พบว่าจะให้ผลแนวโน้มในทิศทางเดียวกับกรณีของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 แต่การขยายตัวจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ทั้งนี้เพราะปริมาณน้ำที่น้อยจะช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับตัวอย่างมอร์ต้าร์ ส่งผลให้สารละลายซัลเฟตเข้าสู่ตัวอย่างได้ยาก และพบว่าในกรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 นั้น การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ไม่ค่อยแตกต่างกันมากนักในทุกกรณี เป็นเพราะการขยายตัวของตัวอย่างเกิดน้อยนั่นเอง

อย่างไรก็ตาม จะสังเกตว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 นั้น การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตทุกความเข้มข้น โดยเฉพาะความเข้มข้นร้อยละ 20 จะให้ผลการประเมินความต้านทานซัลเฟตได้ชัดเจน แสดงว่าถ้าใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยในการประเมินการต้านทานซัลเฟต โดยวัดการขยายตัวนั้น ในความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตที่มาก (ร้อยละ 20) จะทำให้ช่วยร่นระยะเวลาในการประเมินความต้านทานซัลเฟตได้

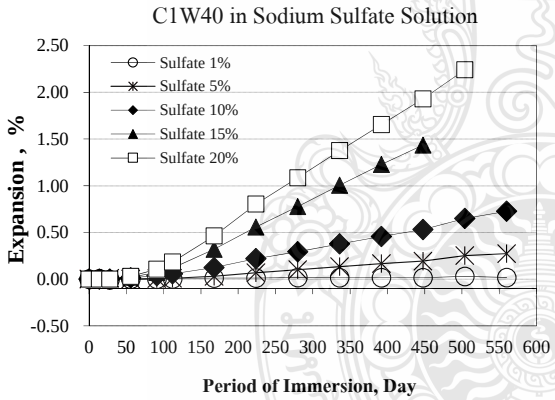


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

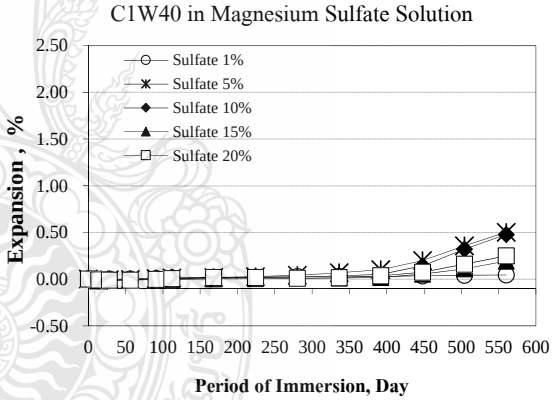


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

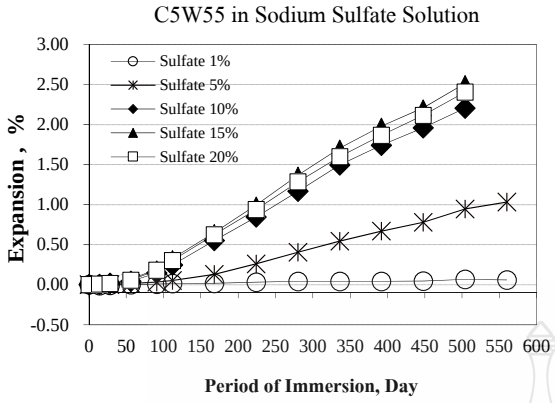


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

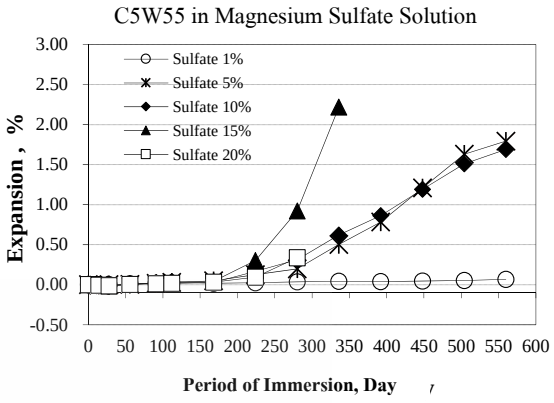


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

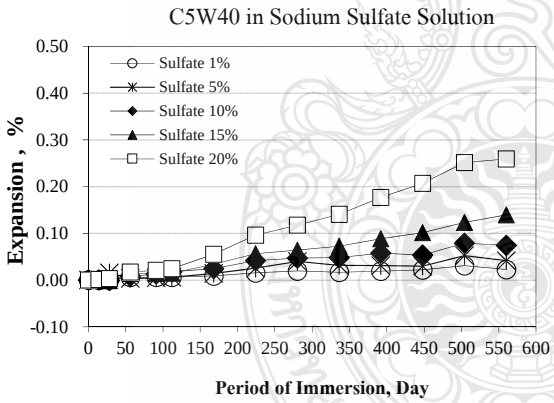


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

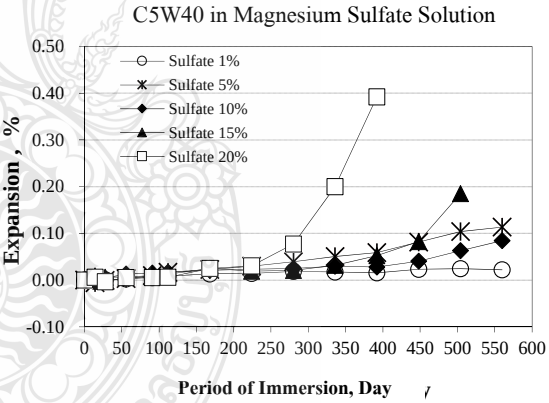


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.66 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

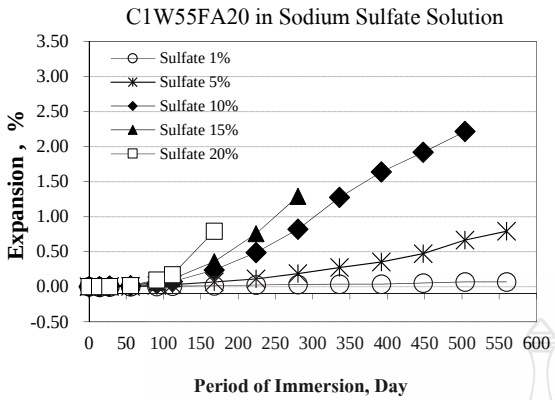


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

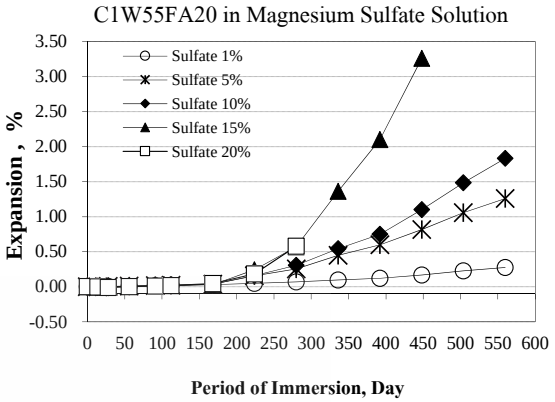


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.67 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

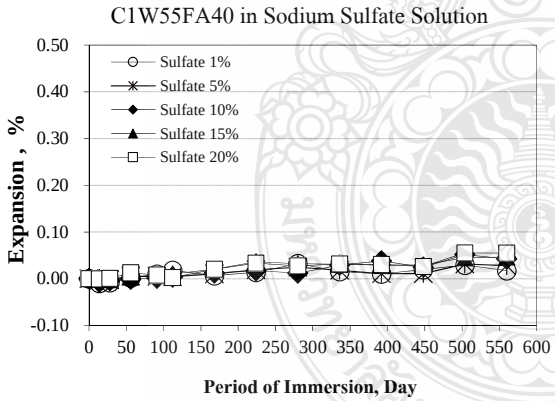


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

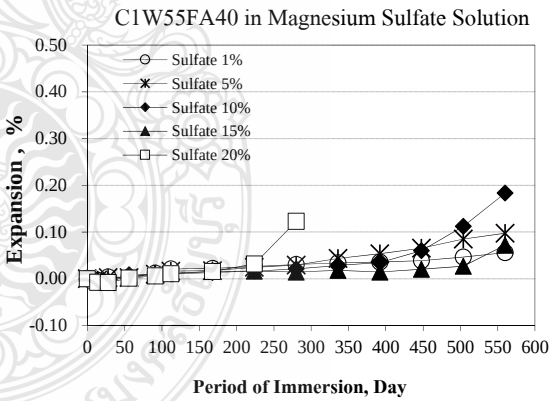


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.68 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 20 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

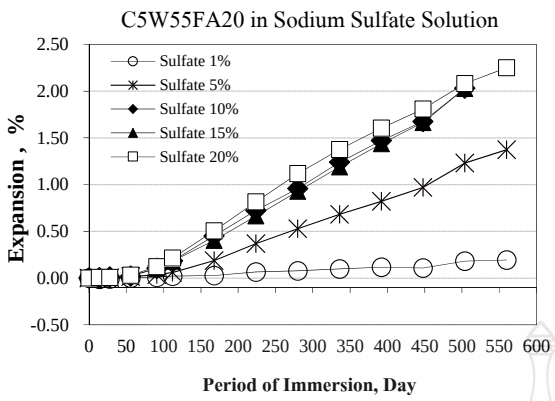


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

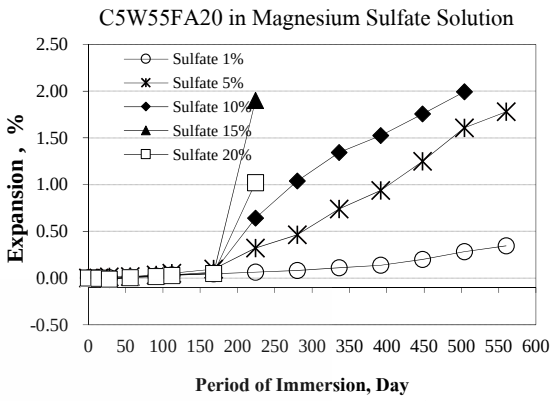


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.69 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

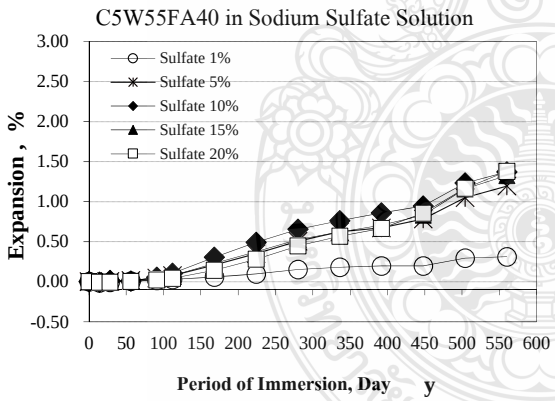


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

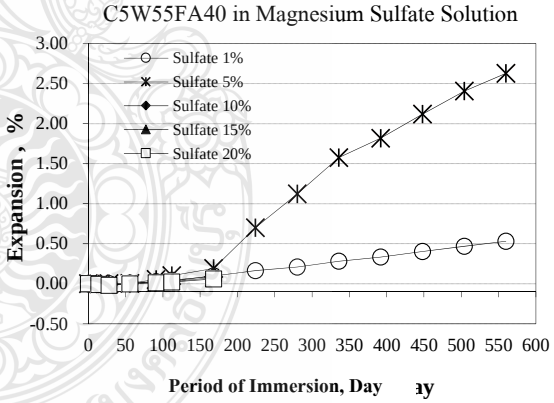


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.70 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 20 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

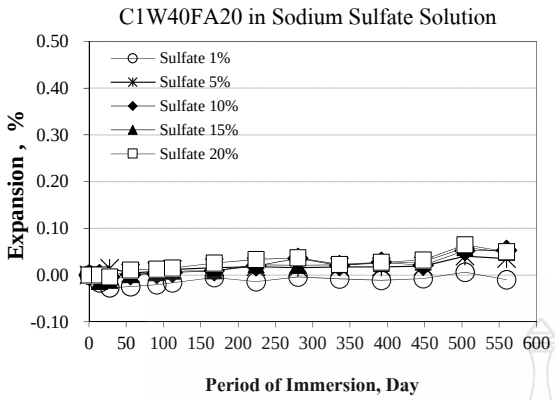


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

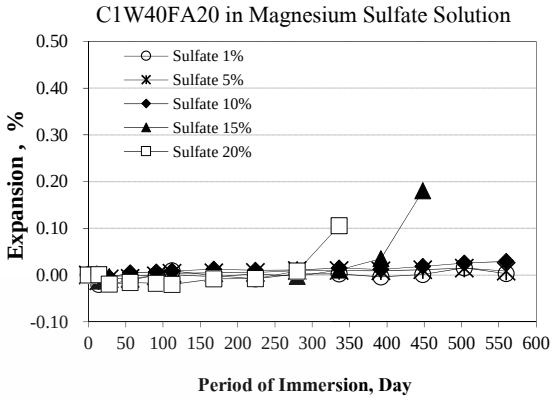


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.71 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

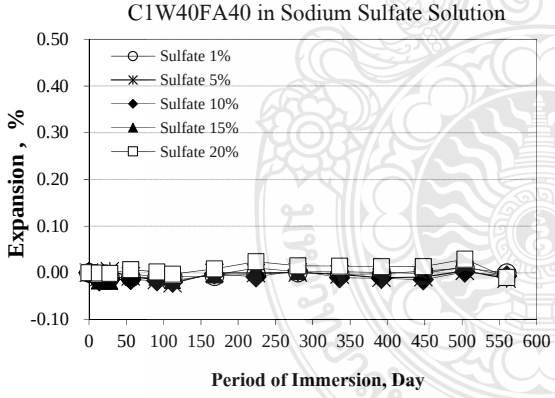


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

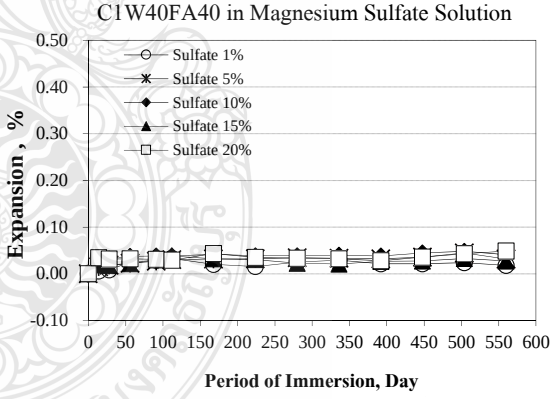


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 20 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

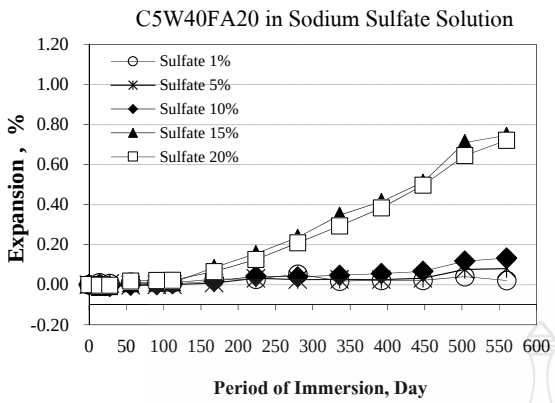


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

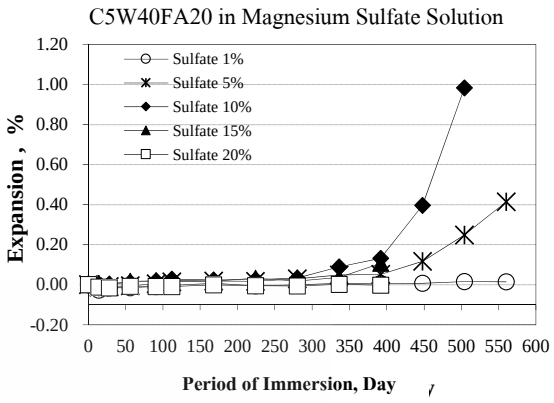


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.73 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

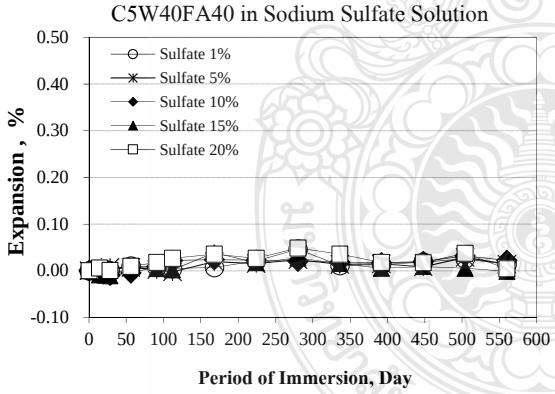


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

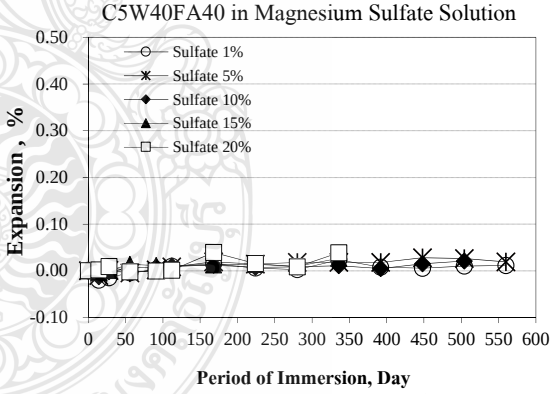


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.74 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 20 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

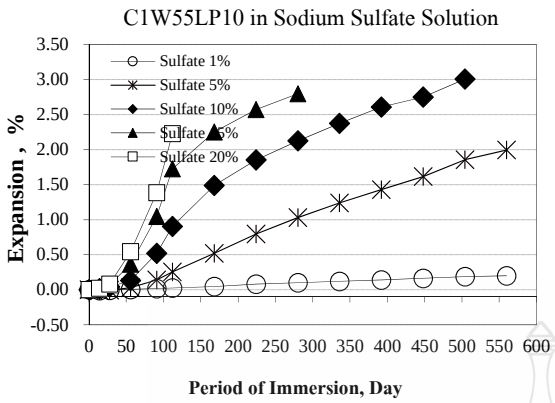


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

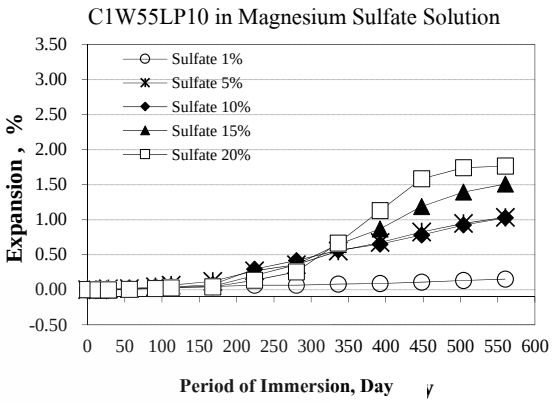


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.75 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

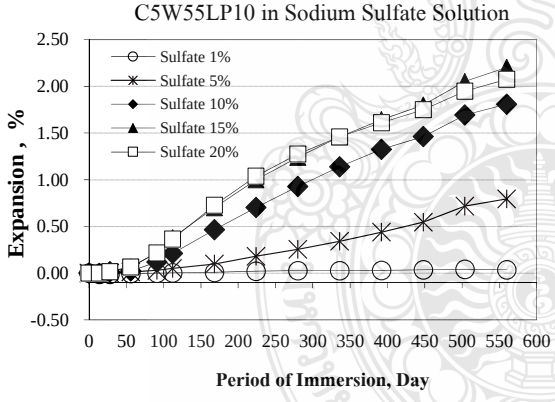


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

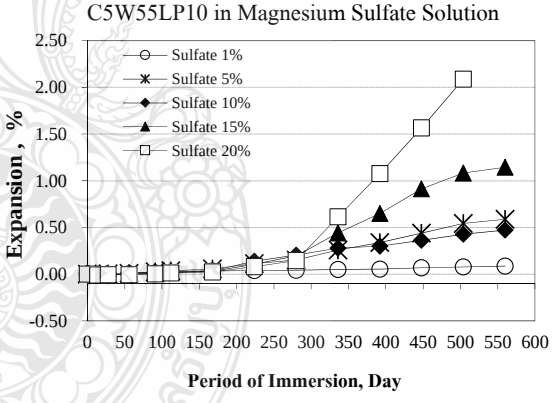


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.76 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

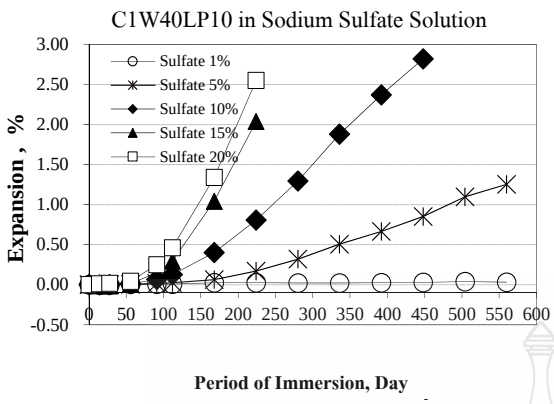


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

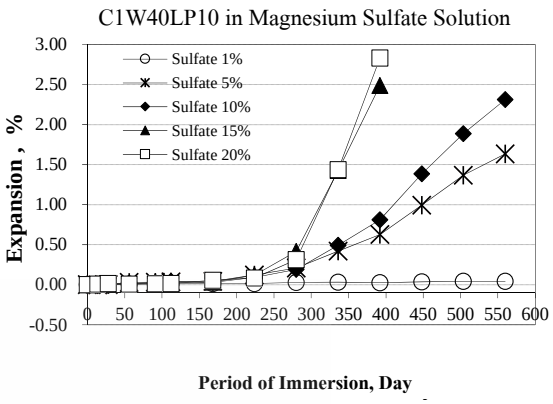


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.77 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

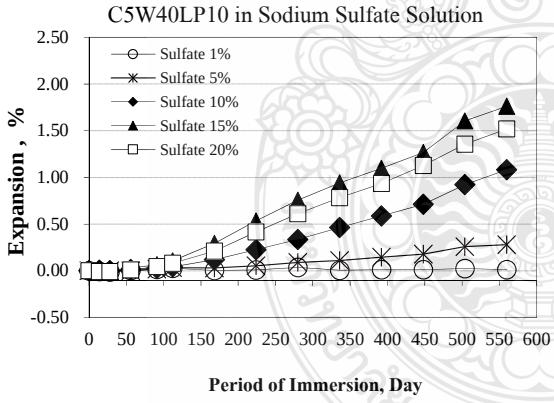


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

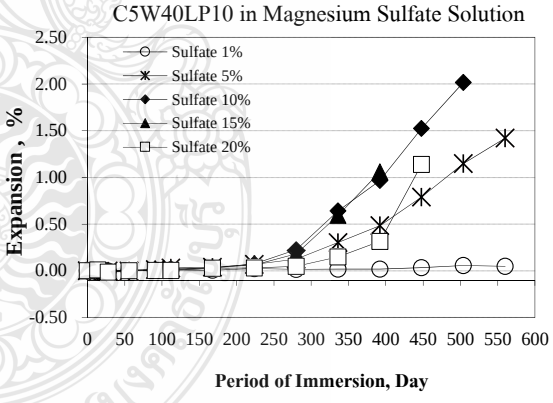


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.78 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

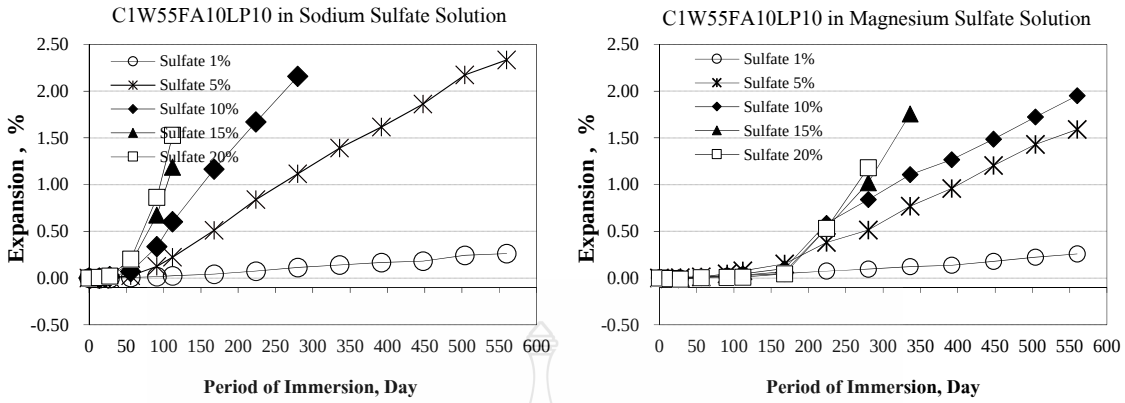


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



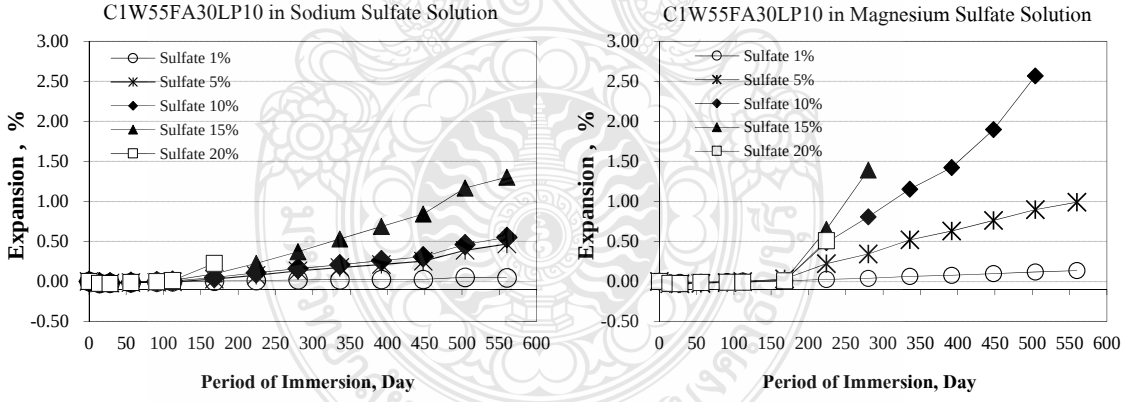
(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.79 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



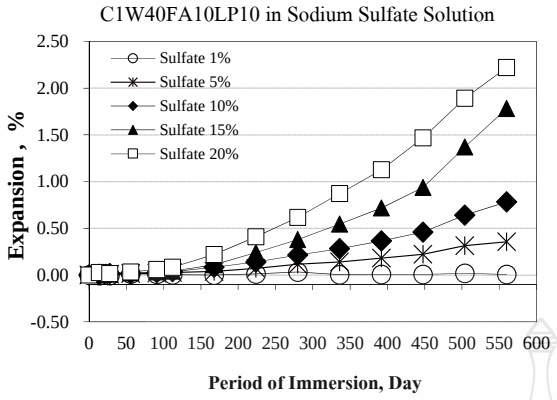
(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.80 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

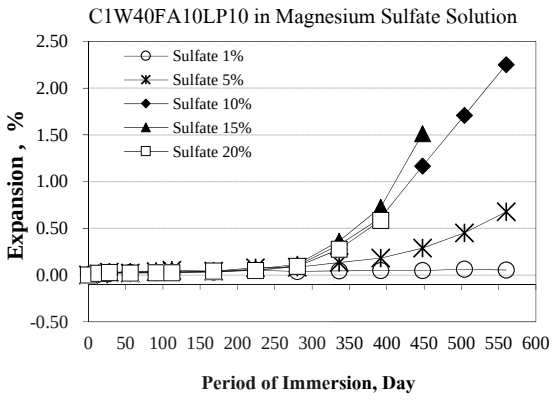


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.81 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

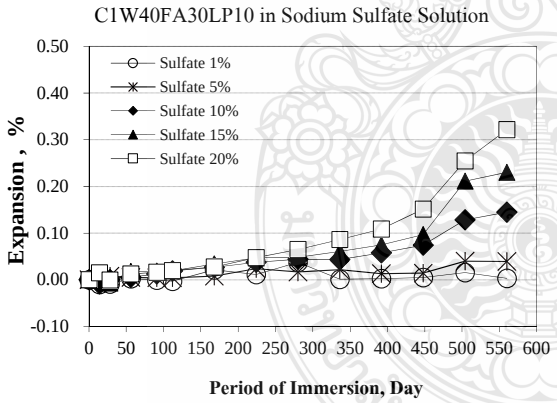


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

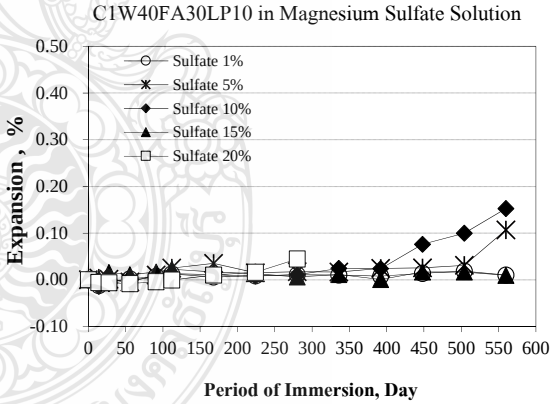


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.82 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

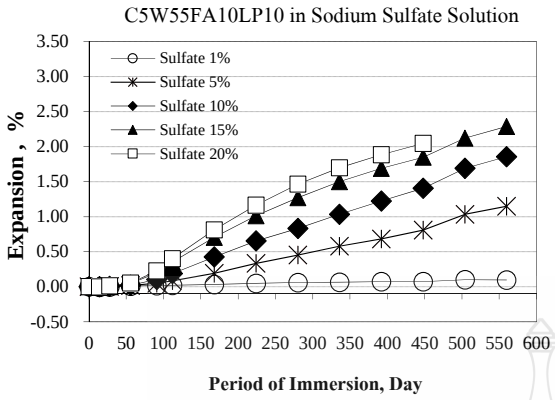


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

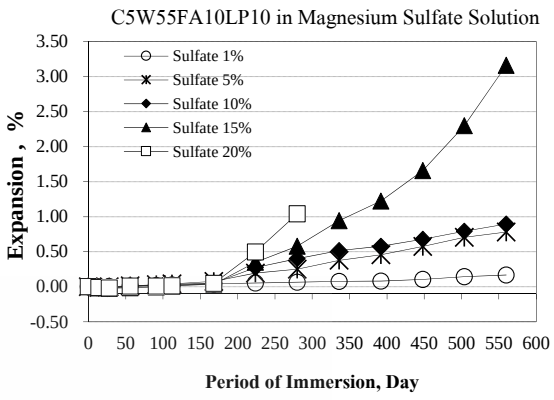


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.83 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

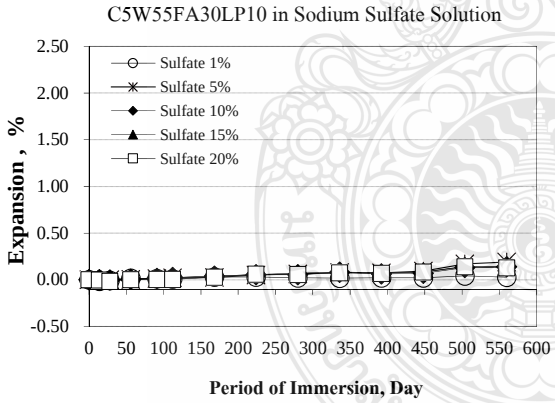


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

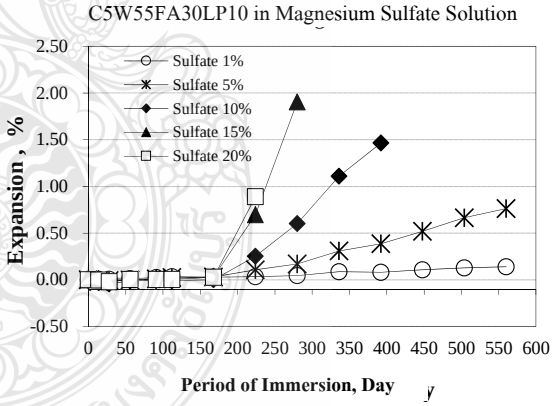


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.84 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

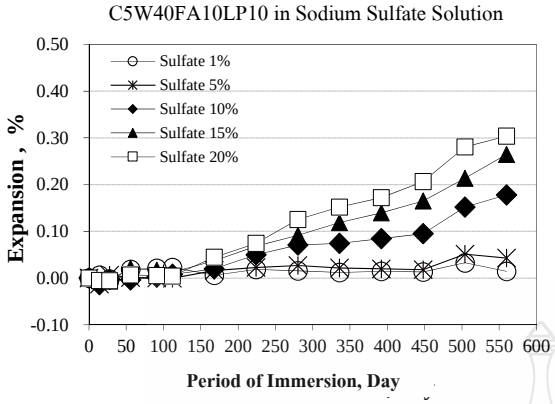


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

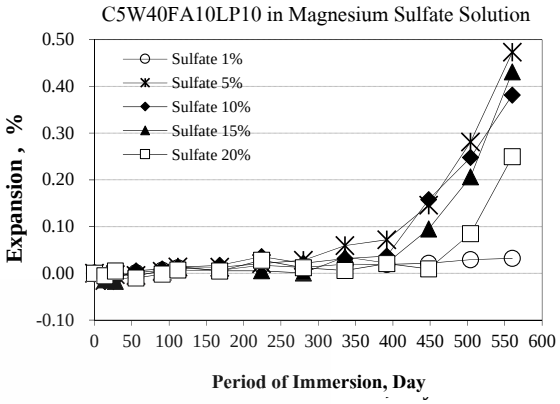


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.85 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

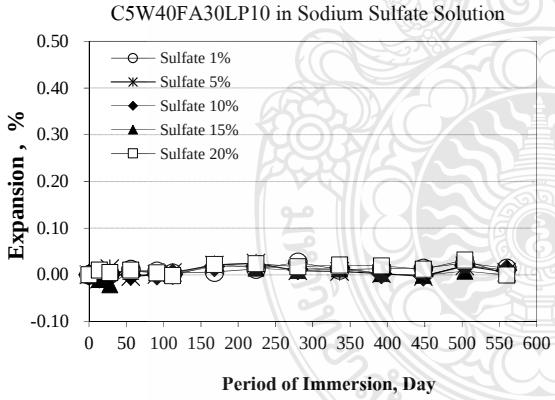


(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

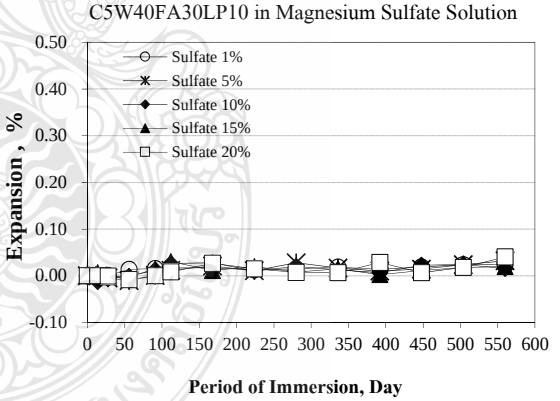


(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.86 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ก) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.87 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

4.2.2 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

การประเมินผลการต้านทานซัลเฟต โดยการวัดการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร ซึ่งได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อการต้านทานซัลเฟต เนื่องจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์

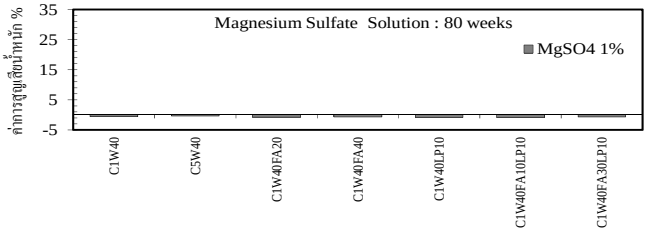
สำหรับชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน ที่ใช้พิจารณาถึงผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน ต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตนั้น วัสดุประสานใช้เหมือนกับกรณีของการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน โดยการแทนที่นั้นใช้เหมือนกรณีของการขยายตัวทุกประการ ส่วนสารละลายซัลเฟตใช้สารละลายแมกนีเซียมเพียงชนิดเดียว เนื่องจากกลไกการทำลายของโซเดียมซัลเฟตไม่ได้เป็นการทำให้สูญเสียเนื้อเพสต์ไป จึงทำให้ไม่มีการสูญเสียน้ำหนัก

4.2.2.1 ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน ต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ศึกษาเมื่ออายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20

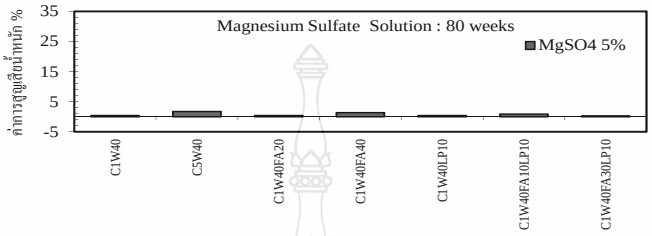
ภาพที่ 4.88 ถึงภาพที่ 4.94 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่ด้วยเถ้าลอย แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตโดยมีความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ระยะเวลาการแช่ 80 สัปดาห์ การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีแนวโน้มมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อความเข้มข้นสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีมาก (ร้อยละ 15 และ 20) จะเห็นชัดเจนขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าความพรุนมากกว่า [2, 3] จึงทำให้สารละลายซัลเฟตเข้าได้มากกว่า ส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่ากรณีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตมากขึ้น (ร้อยละ 15 และ 20) ทั้งนี้ก็เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ความเป็นด่างในมอร์ต้าร์น้อยลง (ลด $Ca(OH_2)$) ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ จึงทำให้ CSH เปลี่ยนเป็น MSH ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้น ทั้งนี้การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ของเถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะทำให้การสูญเสียน้ำหนักมากกว่าของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์แทนที่ผงหินปูน 10 ร้อยละ)) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ผงหินปูนสามารถไปเติมเต็มช่องว่างในมอร์ต้าร์ มีผลให้สารละลายซัลเฟตเข้าทำลายได้ยากขึ้น

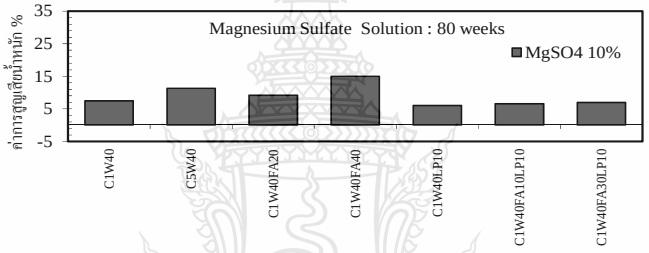
สำหรับการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ กรณีแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนนั้น พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าน้อยกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นเมื่อแทนที่ด้วยปริมาณเถ้าลอยในปริมาณสูง แนวโน้มจะทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานมีผลต่อกรณีสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตทำให้การสูญเสียน้ำหนักมีค่ามากขึ้นดังรายละเอียดที่ได้กล่าวมาแล้ว



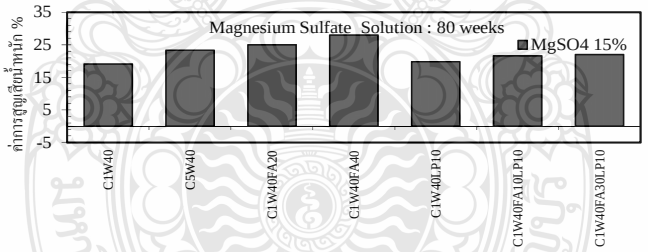
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



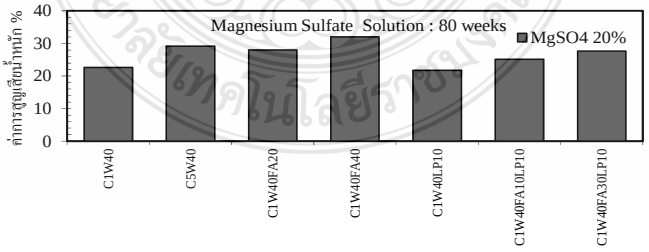
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

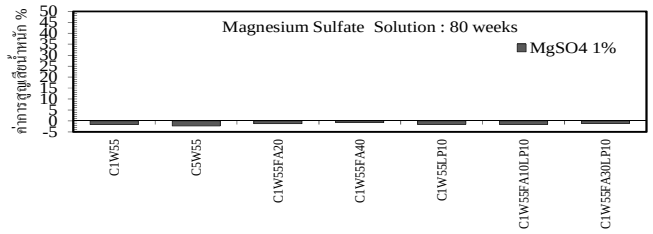


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

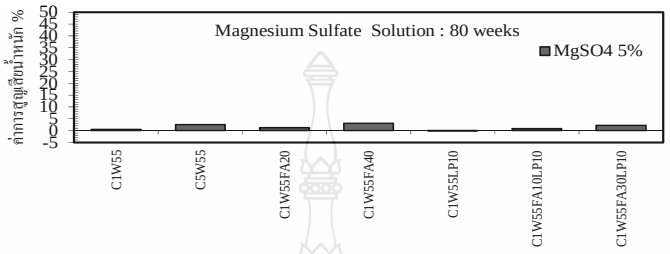


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

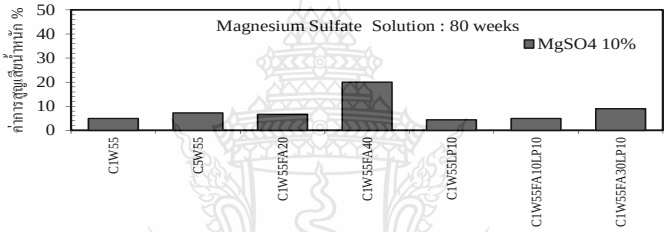
ภาพที่ 4.88 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 เป็นเวลา 80 สัปดาห์



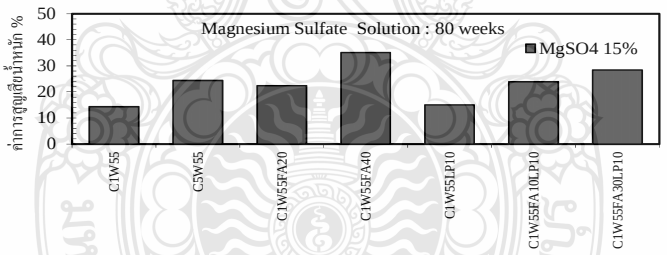
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



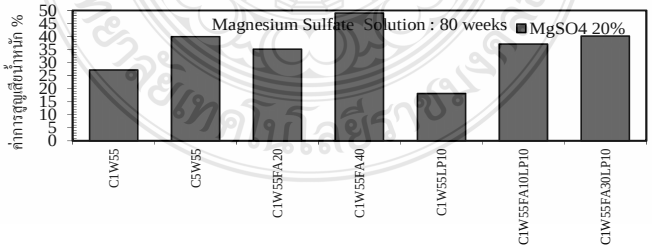
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

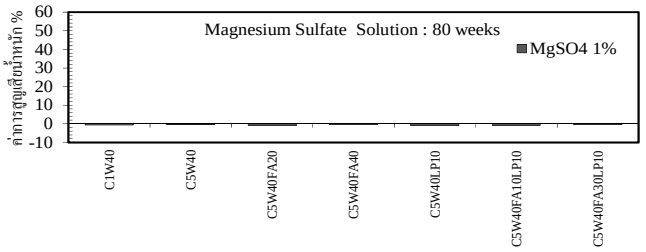


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

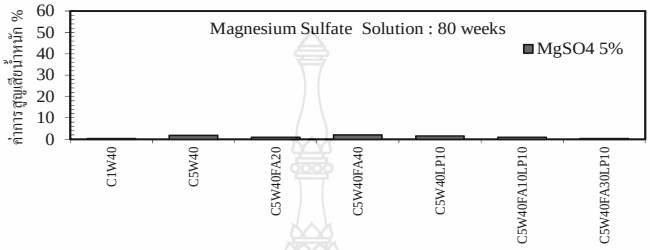


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

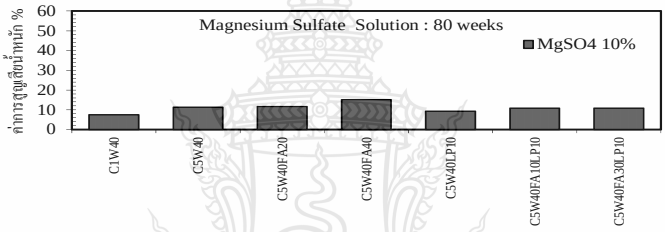
ภาพที่ 4.89 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 เป็นเวลา 80 สัปดาห์



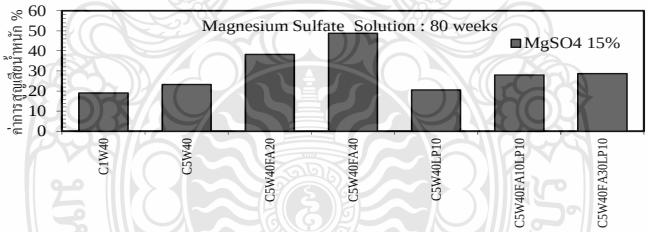
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



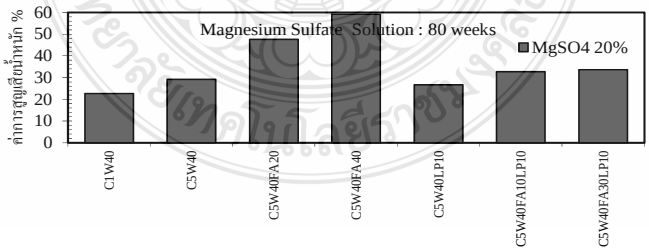
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

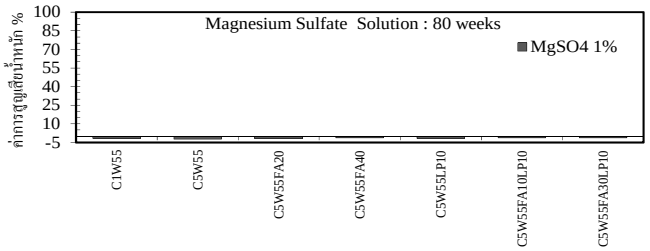


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

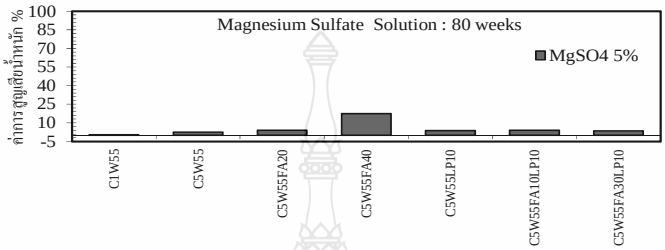


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

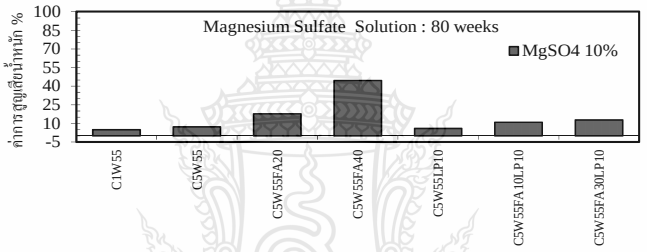
ภาพที่ 4.90 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 เป็นเวลา 80 สัปดาห์



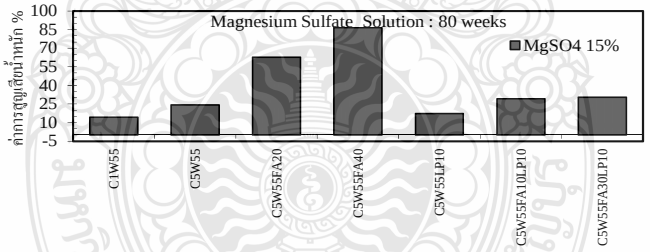
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



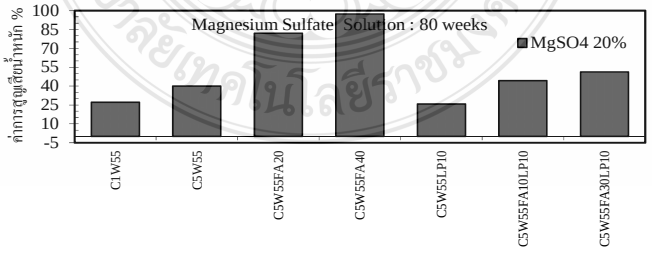
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

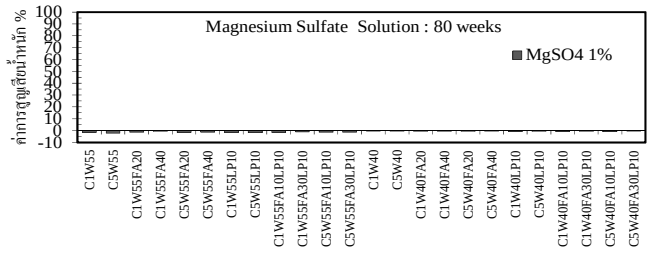


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

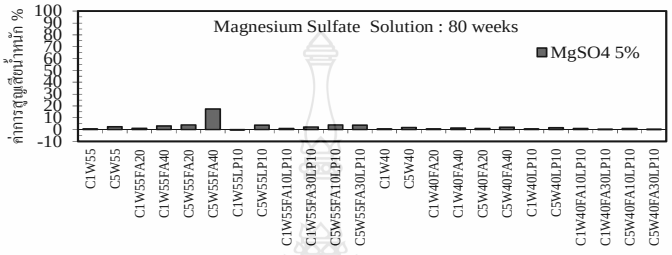


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

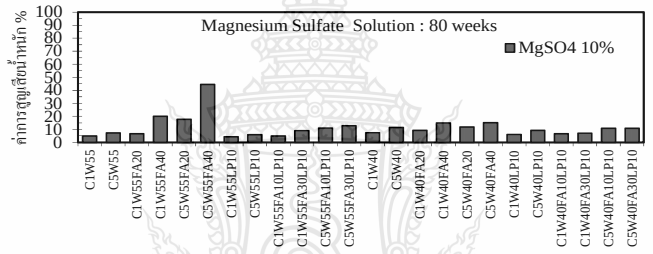
ภาพที่ 4.91 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 **ล้วน** และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 เป็นเวลา 80 สัปดาห์



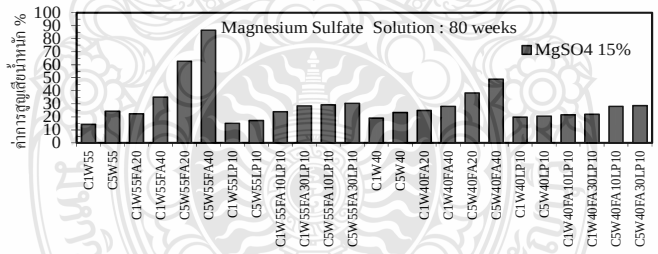
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



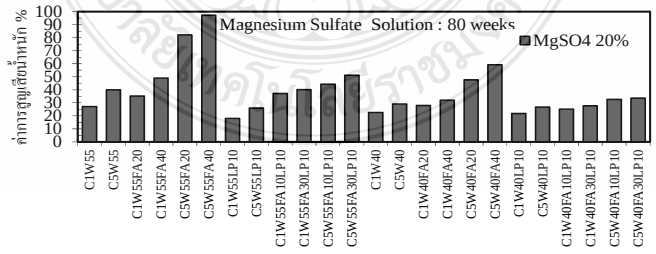
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

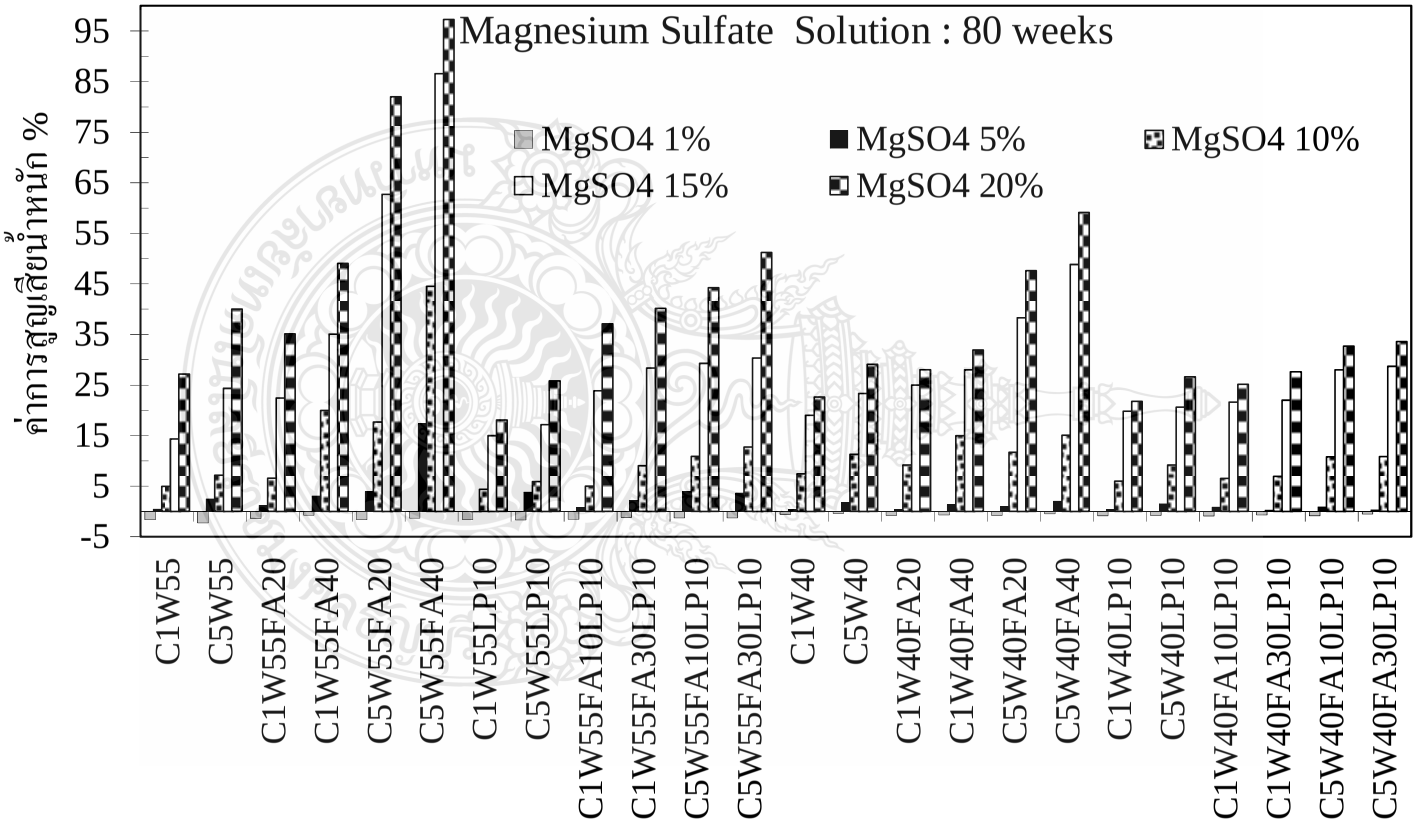


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

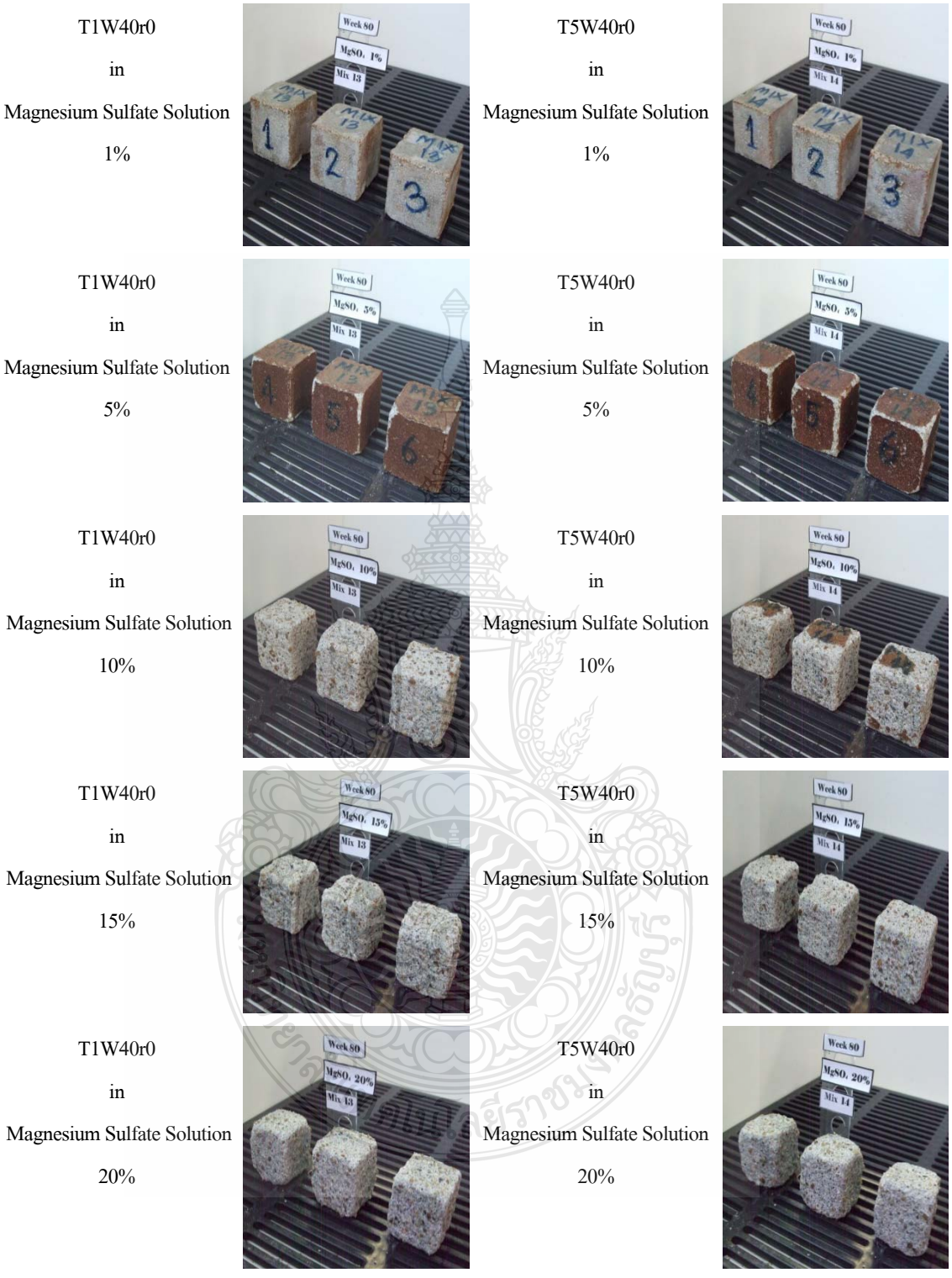


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

ภาพที่ 4.92 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 เป็นเวลา 80 สัปดาห์



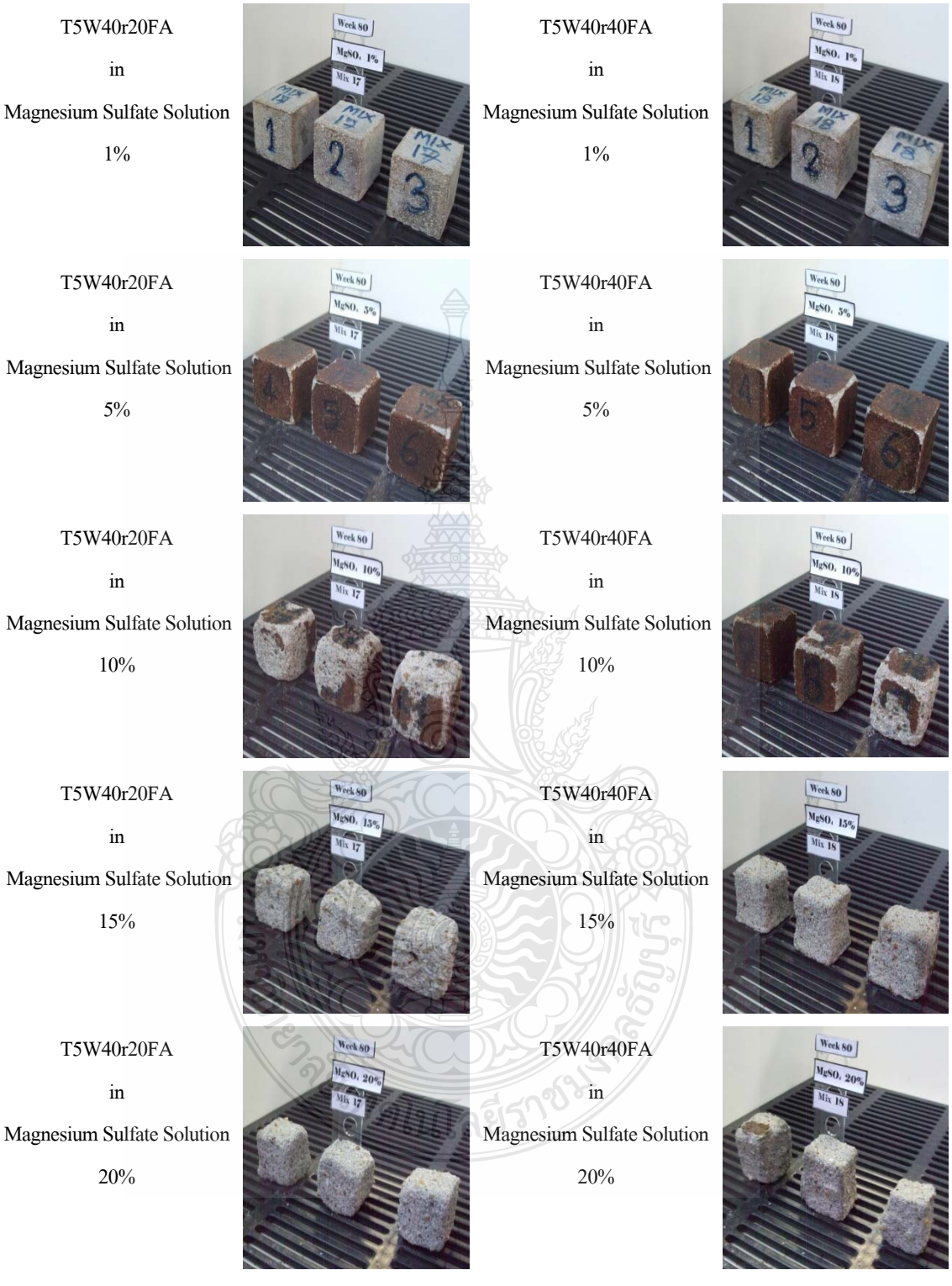
ภาพที่ 4.93 เปรียบเทียบผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ศึกษา เมื่ออายุของการแช่ 80 สัปดาห์



ภาพที่ 4.94 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

T1W40r20FA in Magnesium Sulfate Solution 1%		T1W40r40FA in Magnesium Sulfate Solution 1%	
T1W40r20FA in Magnesium Sulfate Solution 5%		T1W40r40FA in Magnesium Sulfate Solution 5%	
T1W40r20FA in Magnesium Sulfate Solution 10%		T1W40r40FA in Magnesium Sulfate Solution 10%	
T1W40r20FA in Magnesium Sulfate Solution 15%		T1W40r40FA in Magnesium Sulfate Solution 15%	
T1W40r20FA in Magnesium Sulfate Solution 20%		T1W40r40FA in Magnesium Sulfate Solution 20%	

ภาพที่ 4.94 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)



ภาพที่ 4.94 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)

T1W40r10LP in Magnesium Sulfate Solution 1%		T5W40r10LP in Magnesium Sulfate Solution 1%	
T1W40r10LP in Magnesium Sulfate Solution 5%		T5W40r10LP in Magnesium Sulfate Solution 5%	
T1W40r10LP in Magnesium Sulfate Solution 10%		T5W40r10LP in Magnesium Sulfate Solution 10%	
T1W40r10LP in Magnesium Sulfate Solution 15%		T5W40r10LP in Magnesium Sulfate Solution 15%	
T1W40r10LP in Magnesium Sulfate Solution 20%		T5W40r10LP in Magnesium Sulfate Solution 20%	

ภาพที่ 4.94 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)

T1W40r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 1%		T1W40r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 1%	
T1W40r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 5%		T1W40r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 5%	
T1W40r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 10%		T1W40r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 10%	
T1W40r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 15%		T1W40r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 15%	
T1W40r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 20%		T1W40r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 20%	

ภาพที่ 4.94 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)

T5W40r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 1%		T5W40r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 1%	
T5W40r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 5%		T5W40r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 5%	
T5W40r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 10%		T5W40r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 10%	
T5W40r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 15%		T5W40r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 15%	
T5W40r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 20%		T5W40r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 20%	

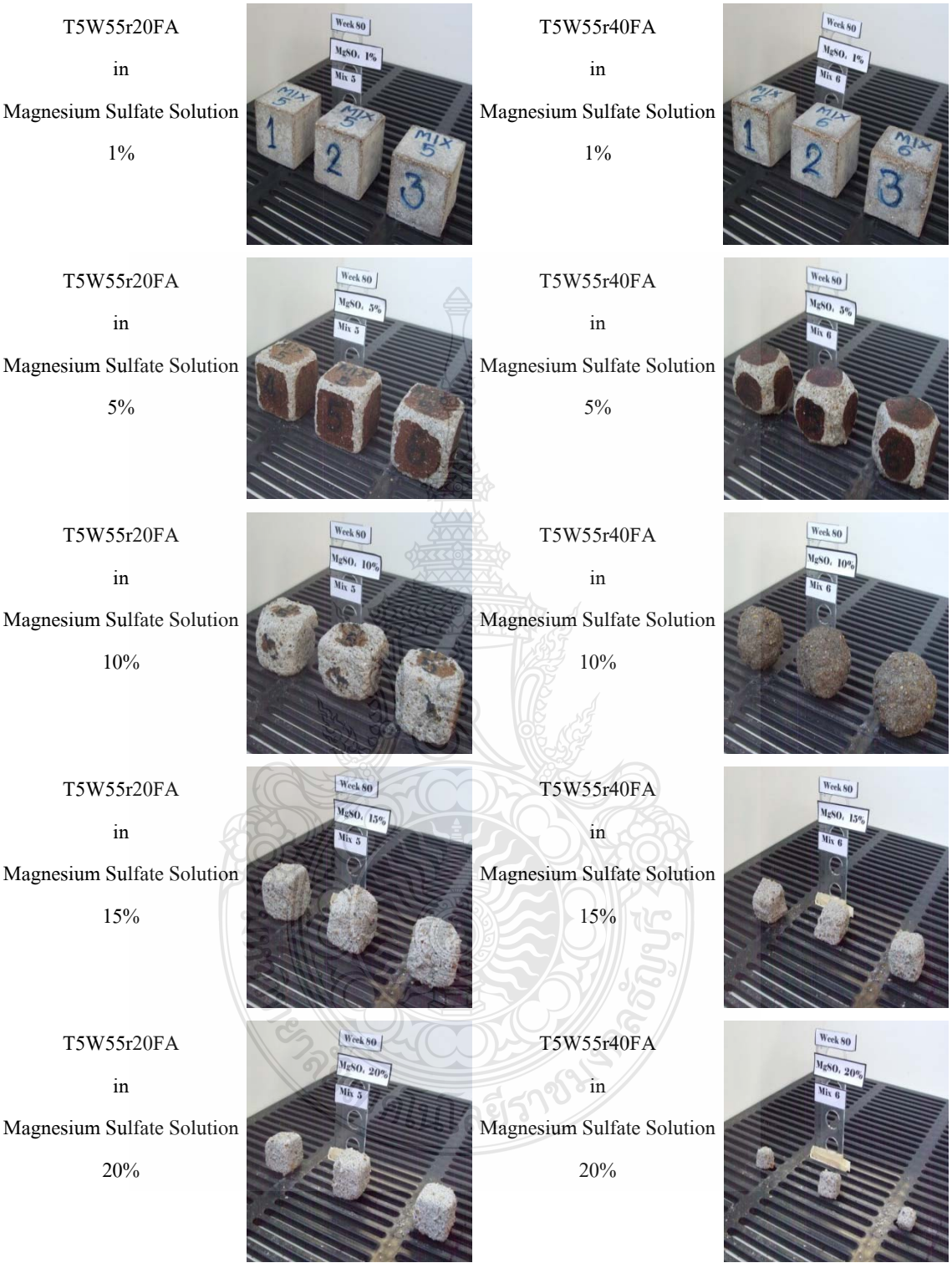
ภาพที่ 4.94 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)

T1W55r0 in Magnesium Sulfate Solution 1%		T5W55r0 in Magnesium Sulfate Solution 1%	
T1W55r0 in Magnesium Sulfate Solution 5%		T5W55r0 in Magnesium Sulfate Solution 5%	
T1W55r0 in Magnesium Sulfate Solution 10%		T5W55r0 in Magnesium Sulfate Solution 10%	
T1W55r0 in Magnesium Sulfate Solution 15%		T5W55r0 in Magnesium Sulfate Solution 15%	
T1W55r0 in Magnesium Sulfate Solution 20%		T5W55r0 in Magnesium Sulfate Solution 20%	

ภาพที่ 4.94 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)

T1W55r20FA in Magnesium Sulfate Solution 1%		T1W55r40FA in Magnesium Sulfate Solution 1%	
T1W55r20FA in Magnesium Sulfate Solution 5%		T1W55r40FA in Magnesium Sulfate Solution 5%	
T1W55r20FA in Magnesium Sulfate Solution 10%		T1W55r40FA in Magnesium Sulfate Solution 10%	
T1W55r20FA in Magnesium Sulfate Solution 15%		T1W55r40FA in Magnesium Sulfate Solution 15%	
T1W55r20FA in Magnesium Sulfate Solution 20%		T1W55r40FA in Magnesium Sulfate Solution 20%	

ภาพที่ 4.94 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)



ภาพที่ 4.94 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)

T1W55r10LP in Magnesium Sulfate Solution 1%		T5W55r10LP in Magnesium Sulfate Solution 1%	
T1W55r10LP in Magnesium Sulfate Solution 5%		T5W55r10LP in Magnesium Sulfate Solution 5%	
T1W55r10LP in Magnesium Sulfate Solution 10%		T5W55r10LP in Magnesium Sulfate Solution 10%	
T1W55r10LP in Magnesium Sulfate Solution 15%		T5W55r10LP in Magnesium Sulfate Solution 15%	
T1W55r10LP in Magnesium Sulfate Solution 20%		T5W55r10LP in Magnesium Sulfate Solution 20%	

ภาพที่ 4.94 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)

T1W55r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 1%		T1W55r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 1%	
T1W55r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 5%		T1W55r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 5%	
T1W55r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 10%		T1W55r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 10%	
T1W55r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 15%		T1W55r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 15%	
T1W55r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 20%		T1W55r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 20%	

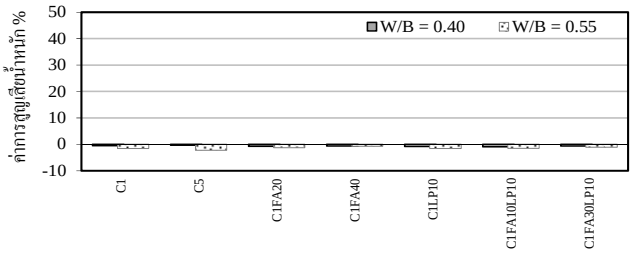
ภาพที่ 4.94 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)

T5W55r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 1%		T5W55r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 1%	
T5W55r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 5%		T5W55r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 5%	
T5W55r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 10%		T5W55r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 10%	
T5W55r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 15%		T5W55r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 15%	
T5W55r10FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 20%		T5W55r30FA10LP in Magnesium Sulfate Solution 20%	

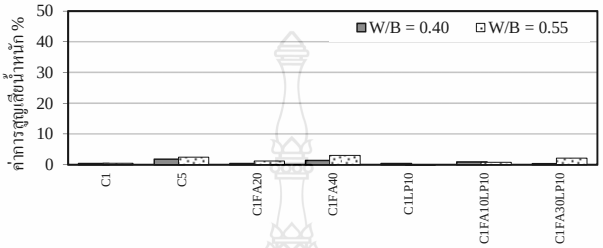
ภาพที่ 4.94 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุของการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)

4.2.2.2 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ศึกษา เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55

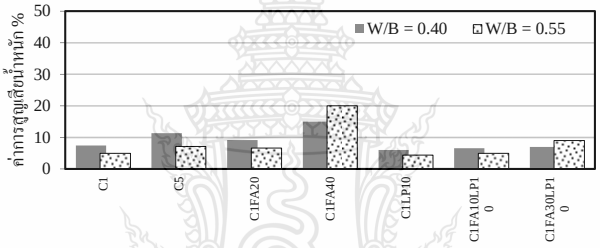
จากภาพที่ 4.95 และภาพที่ 4.96 แสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 โดยแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ระยะเวลาการแช่ 80 สัปดาห์ พบว่าในกรณีที่แช่ตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีความเข้มข้นน้อย (ร้อยละ 1, 5) มีแนวโน้มว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อยกว่า (0.40) จะให้ค่าที่มากกว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากกว่า (0.55) แต่เมื่อความเข้มข้นสาร ละลายแมกนีเซียมซัลเฟตสูงขึ้น (ร้อยละ 20) พบว่าจะให้ผลกลับกัน กล่าวคือการสูญเสียของน้ำหนักตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสานที่มาก จะให้ค่ามากกว่า เมื่อใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อยกว่า ยกเว้นในกรณีตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีแนวโน้มมีความพรุนมาก (แทนที่ด้วยเถ้าลอยอย่างเดียว) ยังคงให้ผลในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือไม่ว่าความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตมากหรือน้อยก็จะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากเมื่อใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงกว่า และจากเหตุผลดังกล่าวเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่น้อยสามารถทำลายตัวอย่าง ซึ่งมีความทึบน้ำมาก (W/B 0.40) นั้น กลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นการทำลายที่เนื้อของคอนกรีตจากภายนอก จึงทำความรุนแรงอยู่ที่ผิวตัวอย่าง ในทำนองกลับกัน ถ้าตัวอย่างมีความพรุนมาก (W/B 0.55) นั้น เมื่อความเข้มข้นสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตสูง สามารถเข้าทำลายได้มาก จึงทำให้การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์มากกว่า



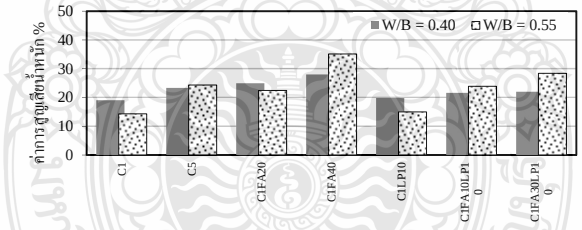
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



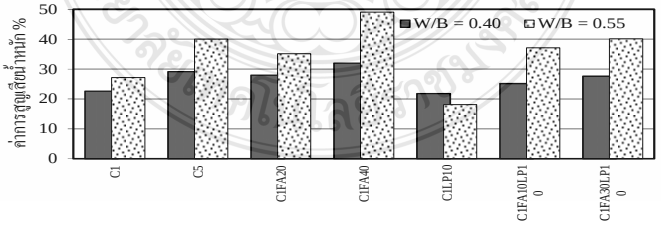
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10

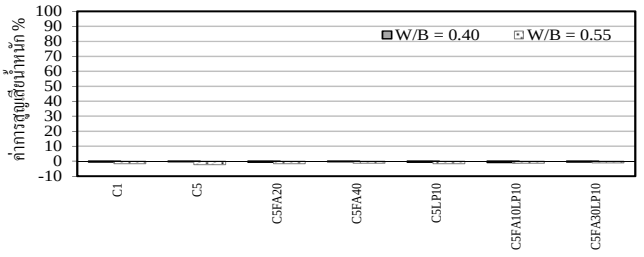


(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

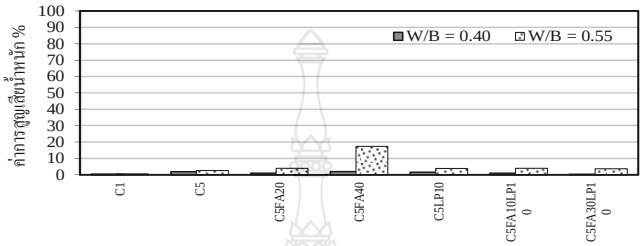


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

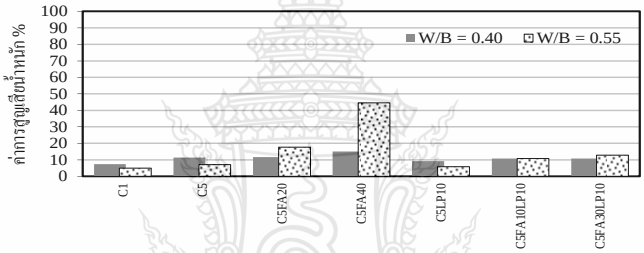
ภาพที่ 4.95 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการขยายตัวและระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



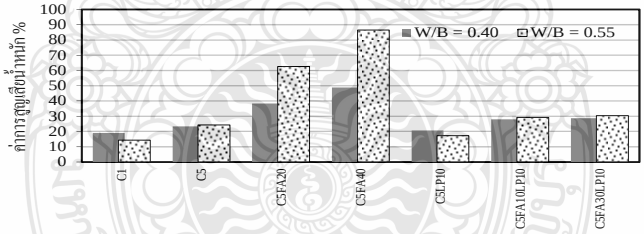
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 1



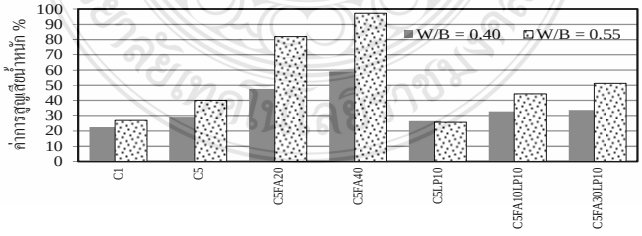
(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 10



(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 15

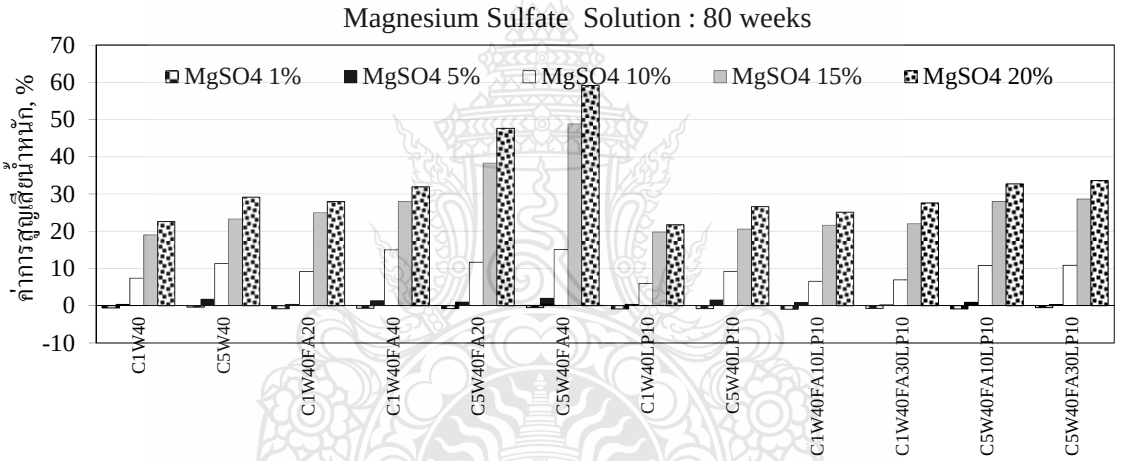


(จ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

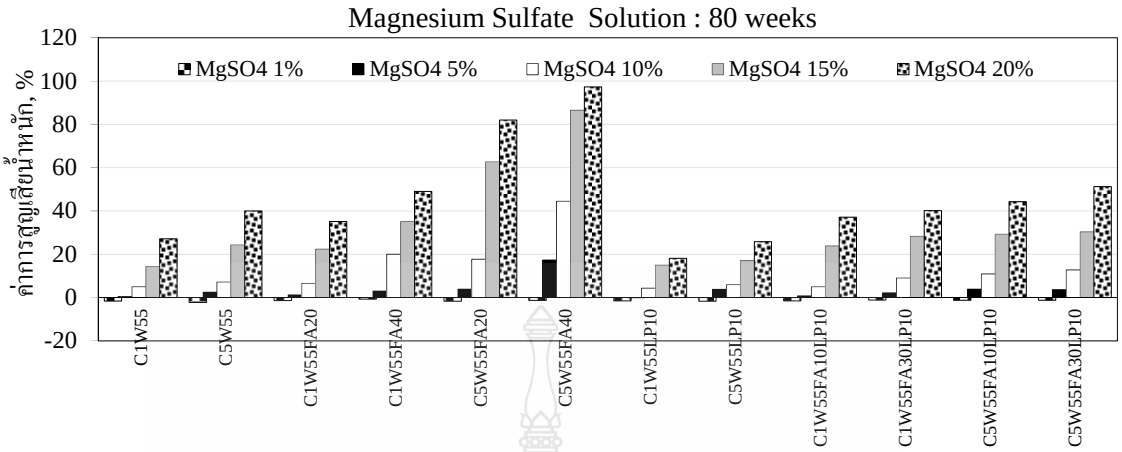
ภาพที่ 4.96 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการขยายตัวและระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

4.2.2.3 ผลกระทบจากความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ศึกษา เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55

จากภาพที่ 4.97 และภาพที่ 4.98 แสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 โดยแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ระยะเวลาการแช่ 80 สัปดาห์ พบว่าในกรณีการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 แม้ว่าอายุตัวอย่าง 80 สัปดาห์แล้วก็ตาม ทุกความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตยังสามารถประเมินความต้านซัลเฟตได้ชัดเจน



ภาพที่ 4.97 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 โดยแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ระยะเวลาการแช่ 80 สัปดาห์



ภาพที่ 4.98 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ระยะเวลาการแช่ 80 สัปดาห์

4.3 สรุปผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายซัลเฟต เพื่อแนะนำความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตในการประเมินความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต

จากกลไกการทำลายของสารละลายซัลเฟต ระหว่างสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ดังที่กล่าวมาแล้วนั้น การทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟตเป็นการเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ให้เป็น Ettringite ซึ่งทำให้ตัวอย่างมอร์ต้าร์เกิดการขยายตัว และแตกร้าว ส่วนการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นการเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ให้เป็น MSH ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน จึงทำให้ตัวอย่างมอร์ต้าร์เกิดการสูญเสียซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดการหลุดล่อนของผิวตัวอย่าง ดังนั้นในการประเมินการต้านทานซัลเฟตของสารละลายโซเดียมซัลเฟตใช้การขยายตัว (Expansion) ส่วนการประเมินการต้านทานซัลเฟตของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตใช้การสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) หรืออาจใช้การขยายตัวร่วมด้วย ดังนั้นในการพิจารณาผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตจะพิจารณาจากการประเมินดังกล่าว

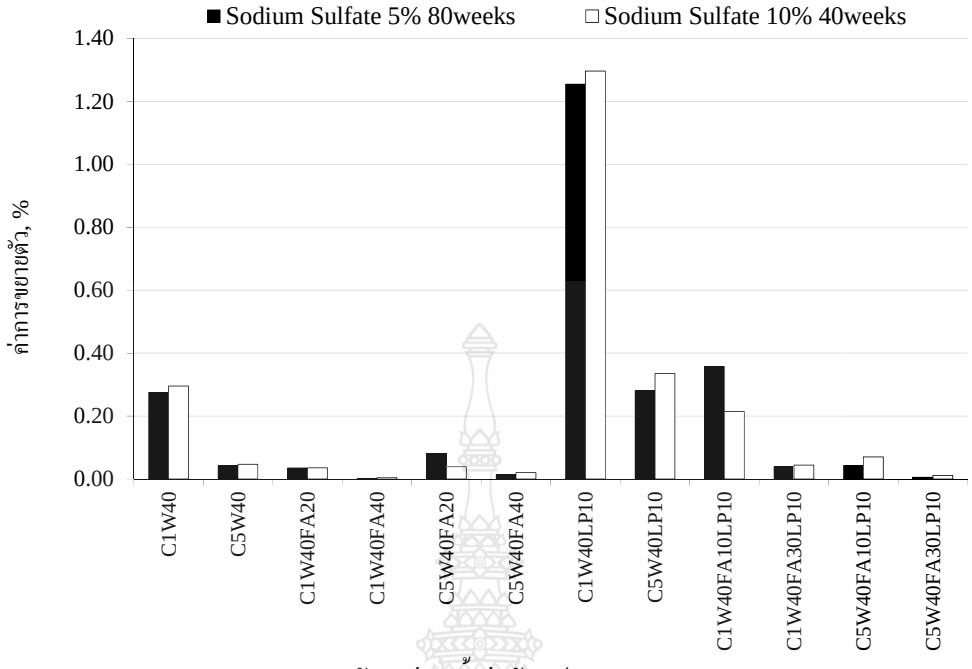
4.3.1 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

จากที่กล่าวมาแล้วในกรณีผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อการขยายตัวในกรณีใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง (0.55) นั้น เมื่อความเข้มข้นที่สูงขึ้น (ในที่นี้ร้อยละ 15 และ 20) สามารถที่จะประเมินความต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างโดยวิธีวัดการขยายตัวได้ โดยได้ผลในทิศทางเดียวกันของตัวอย่างทุกสัดส่วนการผสมของมอร์ต้าร์ และพบว่าเมื่อพิจารณาปริมาณการขยายตัวของตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อายุ 80 สัปดาห์ ให้ค่าใกล้เคียงกับปริมาณการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 10 เมื่ออายุ 40 สัปดาห์ ของการแช่ในสารละลายซัลเฟต แสดงว่าถ้าใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตร้อยละ 10 สามารถร่นระยะเวลาการแช่ได้ 40 สัปดาห์ เมื่อเปรียบเทียบตามมาตรฐาน ASTM C1012 ซึ่งใช้สารละลายเข้มข้นโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 (ตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.99)

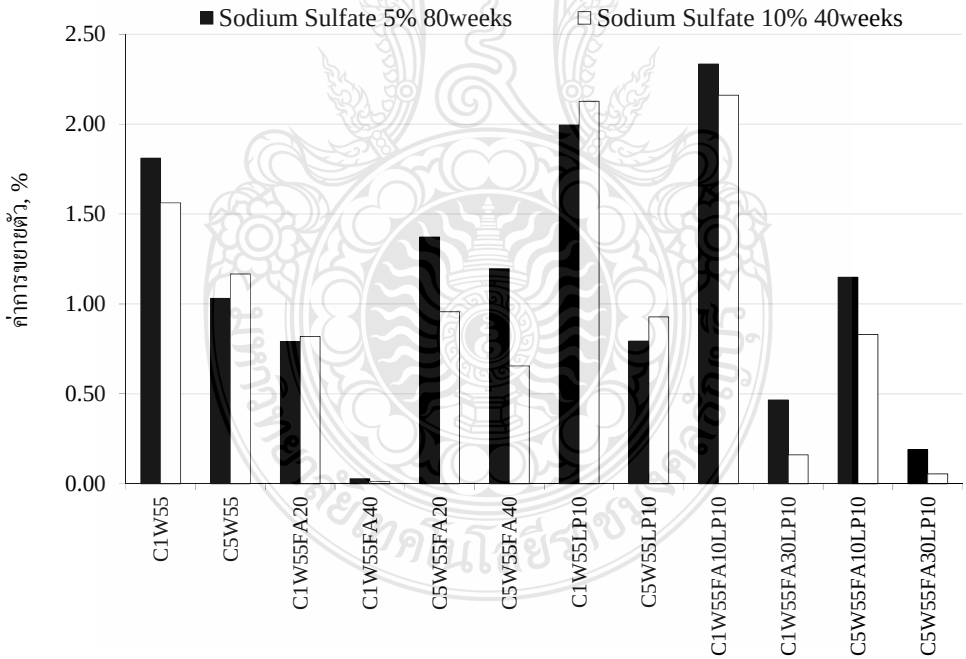
อย่างไรก็ตามในกรณีที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ (0.40) ในการประเมินการต้านทานสารละลายโซเดียมซัลเฟต เมื่อใช้ความเข้มข้นที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ยังให้ผลในทิศทางเดียวกัน แสดงว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่สูง โดยเฉพาะร้อยละ 15 และ 20 ก็ยังสามารถใช้ประเมินได้

ตารางที่ 4.3 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 ที่อายุการแช่ 80 และ 40 สัปดาห์

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ ที่อายุการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 5%	ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ ที่อายุการแช่ 40 สัปดาห์ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 10%
C1W55	1.811	1.562
C5W55	1.032	1.167
C1W55FA20	0.792	0.819
C1W55FA40	0.028	0.012
C5W55FA20	1.373	0.957
C5W55FA40	1.196	0.655
C1W55LP10	1.996	2.127
C5W55LP10	0.794	0.928
C1W55FA10LP10	2.335	2.161
C1W55FA30LP10	0.467	0.161
C5W55FA10LP10	1.150	0.830
C5W55FA30LP10	0.191	0.055
C1W40	0.275	0.296
C5W40	0.042	0.047
C1W40FA20	0.035	0.036
C1W40FA40	0.001	0.005
C5W40FA20	0.081	0.039
C5W40FA40	0.014	0.021
C1W40LP10	1.255	1.296
C5W40LP10	0.280	0.335
C1W40FA10LP10	0.357	0.215
C1W40FA30LP10	0.039	0.044
C5W40FA10LP10	0.043	0.071
C5W40FA30LP10	0.006	0.011



(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

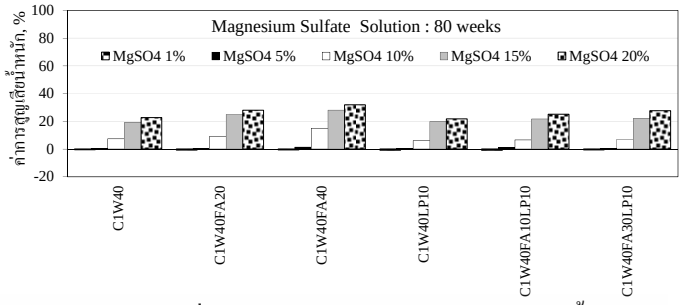


(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

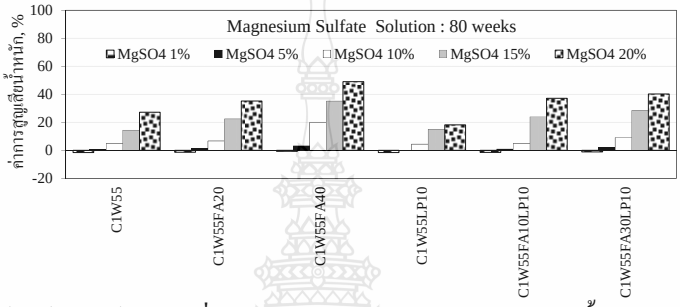
ภาพที่ 4.99 เปรียบเทียบระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสาร ละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อายุ 80 สัปดาห์ และความเข้มข้นร้อยละ 10 ที่อายุ 40 สัปดาห์

4.3.2 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

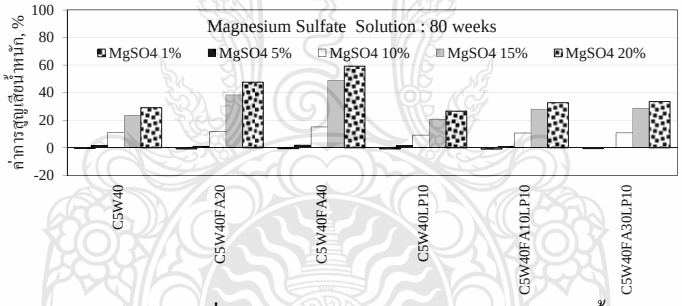
ในกรณีการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 แม้ว่าอายุตัวอย่าง 80 สัปดาห์แล้วก็ตาม ทุกความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตยังสามารถประเมินความต้านซัลเฟตได้ชัดเจน (ยกเว้นที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 ซึ่งมีค่าการขยายตัวน้อยมาก) กล่าวคือทุกความเข้มข้นการสูญเสียที่น้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ทุกสัดส่วนไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่ามากขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่สูงขึ้น นั่นหมายความว่าในการประเมินความต้านทานซัลเฟต กรณีสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยวัดการสูญเสียน้ำหนักนั้น เมื่อใช้ความเข้มข้นร้อยละ 20 สามารถใช้ได้ ซึ่งจะเป็นการช่วยร่นเวลาในการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบตามมาตรฐาน ASTM C1012 ที่ใช้ความเข้มข้นเพียงร้อยละ 5 แสดงดังภาพที่ 4.100



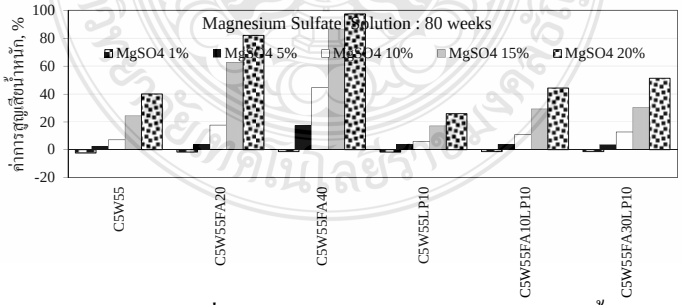
(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย และผงหินปูน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ค) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอย และผงหินปูน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



(ง) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าลอย และผงหินปูน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

ภาพที่ 4.100 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย และผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ที่ระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 เป็นเวลา 80 สัปดาห์

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

สำหรับการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ (ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน) ในสารละลายซัลเฟตที่มีความเข้มข้นต่างกัน (ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก) โดยวัดการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต และวัดการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ผลการศึกษามีข้อสรุปดังนี้

5.1.1 ในสารละลายซัลเฟต (ทั้งโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต) การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ให้ค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.2 ในสารละลายซัลเฟต การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน (ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5) ให้ค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ยกเว้นเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนอย่างเดียวจะให้ค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

5.1.3 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 จะให้ค่าการขยายตัวน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต

5.1.4 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น การแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ค่อนข้างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยที่มากขึ้น ขณะที่ในตัวอย่างมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 นั้น การสูญเสียน้ำหนักมีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน

5.1.5 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นน้อย (ร้อยละ 1 และ 5) จะทำลายตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีความทึบน้ำสูง ได้มากกว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีความทึบน้ำต่ำ แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตที่สูง (ในที่นี้ร้อยละ15 และ 20) การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีความทึบน้ำต่ำจะมีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์ที่ทึบน้ำสูง

5.1.6 ในการประเมินการต้านทานสารละลายโซเดียมซัลเฟตโดยวิธีวัดค่าการขยายตัวนั้น สามารถใช้ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตร้อยละ 10, 15 และ 20 ประเมินได้เช่นเดียวกับที่ความเข้มข้นร้อยละ 5

5.1.7 ในการประเมินการต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตโดยวิธีวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักนั้น พบว่าในความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต ร้อยละ 10, 15 และ 20 ยังสามารถใช้ประเมินการต้านทานซัลเฟตได้เช่นเดียวกับที่ความเข้มข้นร้อยละ 5

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ ดังนั้น ควรพิจารณาใช้ตัวอย่างคอนกรีตเพื่อให้ได้ผลใกล้เคียงกับการใช้งานคอนกรีตในสภาพสิ่งแวดล้อมที่เป็นจริง

5.2.2 สารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ดังนั้น ควรเพิ่มกรณีสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

5.2.3 ในสิ่งแวดล้อมจริงมีสารละลายอื่นที่นอกเหนือจากสารละลายซัลเฟตเป็นส่วนผสมด้วย เช่น สารคลอไรด์ เป็นต้น ดังนั้นจึงควรพิจารณานำสารคลอไรด์มาเป็นส่วนผสมในสารละลายซัลเฟต

บรรณานุกรม

[1] สมนึก ตั้งเติมสิริกุล. 2543, "**ความคงทนของคอนกรีต**" กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.

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

[3] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, "**ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต**" กรุงเทพฯ, สมาคมคอนกรีตไทย, 2547.

[4] ผศ. ดร. ปิติศานต์ กร้ำมาตร, "**คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน**" ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553.

[5] จตุพร ชูตาภา และวรพจน์ แสงราม, "**แคลเซี่ยมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate : $CaCO_3$)**", วิหารแดง, ปีที่ 1, ฉบับที่ 6 มิถุนายน 2552, หน้า 5.

[6] นพคุณ ผลโพธิ์, "**ผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์**", ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.

[7] American Society for Testing and Material, **Annual Book of ASTM Standard**, V 04.02, Easton, Md., USA., 1996

[8] American Society for Testing and Materials, ASTM C618 - 00, 2001, "**Standard Specification for Coal Fly and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use a Mineral Admixture in Concrete**", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, p.310 - 313.

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

[10] 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.

[11] American Concrete Institute, ACI Committee 201, "**Guide to Durable Concrete**", ACI 201. 2R-92, 1992.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[12] Al-Amoudi at el., O.S.B., "**Maslehuddin M., Saadi, M.M., 1995**", Effect of magnesium and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements, ACI Materials Journal 92: pp.15-24.

[13] Al-Dulaijan S.U., Maslehuddin M., Al-Zahrani M.M., Sharif A.M., Shameem M., Ibrahim M., 2003. "**Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate**," Cement & Concrete Composites 25: Article in press.

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

[15] ณัฐวรรธน์อักษรกาญจน์, และคณะ. 2548. "**คุณสมบัติของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน**" ปริญญานิพนธ์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[16] ชรรณสิทธิ์ เจือจ้อย, และคณะ. 2549. "**การต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูนผสมเถ้าลอย**" ปริญญานิพนธ์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี.

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

[18] ทีฆทัศ, และคณะ. 2550. "**การขยายตัวของมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในสารละลายซัลเฟต**," ปริญญานิพนธ์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[19] ขวัญตา, และคณะ. 2553. "**การขยายตัวมอร์ต้าร์ผงหินปูนในสารละลายซัลเฟต**," ปริญญานิพนธ์บัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[20] พิพัฒน์, และคณะ. 2554. "**คุณสมบัติเบื้องต้นและการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน**," ปริญญานิพนธ์บัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[21] พร้อมพงศ์ ฉลาดธัญญกิจ, 2554 "**ผลกระทบของแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอยต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายซัลเฟต**," ปริญญานิพนธ์บัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)

ตารางที่ ก.1 ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่ความเข้มข้น 1%

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W55	0.000	-0.004	-0.002	0.008	0.014	0.020	0.021	0.034	0.046	0.048	0.050	0.060	0.079	0.075
C5W55	0.000	-0.008	-0.005	0.003	0.008	0.014	0.019	0.031	0.042	0.043	0.043	0.046	0.067	0.061
C1W55FA20	0.000	-0.007	-0.004	0.004	0.006	0.009	0.013	0.025	0.035	0.036	0.036	0.052	0.070	0.068
C1W55FA40	0.000	-0.010	-0.008	0.002	0.010	0.018	0.006	0.014	0.032	0.015	0.011	0.020	0.029	0.017
C5W55FA20	0.000	-0.011	-0.008	0.001	0.011	0.021	0.028	0.067	0.079	0.098	0.115	0.108	0.181	0.195
C5W55FA40	0.000	-0.011	-0.007	0.007	0.017	0.028	0.059	0.100	0.154	0.183	0.200	0.200	0.294	0.313
C1W55LP10	0.000	-0.009	-0.005	0.008	0.017	0.027	0.044	0.081	0.100	0.119	0.140	0.163	0.189	0.201
C5W55LP10	0.000	-0.012	-0.011	-0.002	0.001	0.005	0.010	0.021	0.029	0.027	0.031	0.038	0.042	0.037
C1W55FA10LP10	0.000	-0.006	-0.003	0.006	0.014	0.023	0.043	0.074	0.114	0.141	0.167	0.183	0.244	0.261
C1W55FA30LP10	0.000	-0.022	-0.019	-0.012	-0.007	-0.002	0.003	0.012	0.022	0.022	0.024	0.025	0.053	0.046
C5W55FA10LP10	0.000	-0.005	0.000	0.009	0.016	0.023	0.034	0.049	0.063	0.067	0.073	0.072	0.101	0.098
C5W55FA30LP10	0.000	-0.014	-0.005	0.016	0.013	0.010	0.031	0.031	0.023	0.019	0.021	0.023	0.044	0.027

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W40	0.000	0.004	-0.005	0.001	0.002	0.003	0.014	0.014	0.019	0.015	0.015	0.017	0.030	0.018
C5W40	0.000	0.000	0.001	0.006	0.006	0.006	0.009	0.016	0.020	0.017	0.019	0.022	0.031	0.023
C1W40FA20	0.000	-0.017	-0.027	-0.025	-0.021	-0.016	-0.005	-0.014	-0.004	-0.008	-0.011	-0.008	0.006	-0.010
C1W40FA40	0.000	-0.012	-0.010	-0.010	-0.009	-0.009	-0.007	-0.002	0.001	-0.004	-0.002	0.004	0.011	0.000
C5W40FA20	0.000	0.010	0.006	0.014	0.012	0.011	0.028	0.028	0.054	0.019	0.023	0.023	0.040	0.022
C5W40FA40	0.000	-0.006	0.000	0.011	0.008	0.005	0.007	0.021	0.046	0.011	0.014	0.018	0.026	0.014
C1W40LP10	0.000	-0.004	-0.002	0.007	0.008	0.009	0.026	0.025	0.024	0.022	0.025	0.027	0.041	0.032
C5W40LP10	0.000	-0.004	-0.010	0.003	0.015	0.027	0.003	0.010	0.036	0.008	0.014	0.014	0.024	0.013
C1W40FA10LP10	0.000	-0.004	-0.004	0.014	0.008	0.003	0.001	0.014	0.033	0.004	0.006	0.008	0.019	0.007
C1W40FA30LP10	0.000	-0.010	-0.009	0.002	0.000	-0.003	0.022	0.011	0.038	0.001	0.003	0.005	0.015	0.003
C5W40FA10LP10	0.000	0.006	-0.002	0.019	0.021	0.023	0.006	0.019	0.016	0.012	0.015	0.013	0.033	0.014
C5W40FA30LP10	0.000	0.001	0.002	0.012	0.008	0.004	0.006	0.013	0.027	0.011	0.013	0.014	0.026	0.014

ตารางที่ ก.2 ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่ความเข้มข้น 5%

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W55	0.000	-0.001	0.009	0.028	0.073	0.117	0.271	0.518	0.760	1.020	1.220	1.424	1.669	1.811
C5W55	0.000	0.000	0.003	0.014	0.033	0.052	0.129	0.262	0.405	0.544	0.668	0.781	0.946	1.032
C1W55FA20	0.000	-0.007	0.005	0.006	0.017	0.028	0.068	0.112	0.188	0.275	0.355	0.471	0.665	0.792
C1W55FA40	0.000	-0.004	-0.002	0.006	0.005	0.004	0.011	0.019	0.025	0.018	0.011	0.011	0.032	0.028
C5W55FA20	0.000	-0.004	0.004	0.015	0.037	0.059	0.187	0.367	0.528	0.683	0.822	0.971	1.230	1.373
C5W55FA40	0.000	0.002	0.004	0.015	0.046	0.076	0.209	0.350	0.506	0.625	0.671	0.783	1.048	1.196
C1W55LP10	0.000	-0.016	-0.005	0.028	0.141	0.254	0.518	0.798	1.028	1.239	1.427	1.614	1.855	1.996
C5W55LP10	0.000	-0.003	0.001	0.012	0.031	0.050	0.097	0.181	0.255	0.343	0.439	0.545	0.717	0.794
C1W55FA10LP10	0.000	-0.013	0.005	0.024	0.124	0.224	0.512	0.841	1.117	1.391	1.617	1.862	2.174	2.335
C1W55FA30LP10	0.000	-0.021	-0.019	-0.013	-0.010	-0.006	0.028	0.079	0.132	0.175	0.212	0.255	0.389	0.467
C5W55FA10LP10	0.000	-0.004	0.005	0.017	0.050	0.083	0.191	0.335	0.454	0.581	0.683	0.809	1.032	1.150
C5W55FA30LP10	0.000	-0.009	0.000	0.004	0.013	0.021	0.026	0.051	0.064	0.078	0.076	0.092	0.169	0.191

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W40	0.000	-0.007	0.010	0.002	0.007	0.011	0.032	0.069	0.103	0.133	0.168	0.194	0.254	0.275
C5W40	0.000	0.000	0.015	0.004	0.005	0.006	0.014	0.026	0.040	0.031	0.031	0.030	0.052	0.042
C1W40FA20	0.000	0.001	0.014	0.004	0.008	0.012	0.015	0.018	0.016	0.017	0.017	0.019	0.041	0.035
C1W40FA40	0.000	-0.009	0.003	-0.008	-0.015	-0.022	-0.001	-0.001	0.001	-0.003	-0.011	-0.009	0.004	-0.012
C5W40FA20	0.000	-0.001	0.006	-0.002	-0.001	0.000	0.009	0.033	0.026	0.027	0.025	0.033	0.076	0.081
C5W40FA40	0.000	0.002	0.007	0.007	0.002	-0.002	0.020	0.016	0.024	0.014	0.015	0.009	0.029	0.014
C1W40LP10	0.000	-0.007	0.003	0.003	0.014	0.025	0.063	0.171	0.320	0.506	0.667	0.852	1.099	1.255
C5W40LP10	0.000	-0.011	0.001	0.001	0.018	0.035	0.032	0.054	0.090	0.111	0.147	0.180	0.258	0.280
C1W40FA10LP10	0.000	-0.001	0.010	0.016	0.021	0.027	0.040	0.071	0.117	0.140	0.181	0.223	0.315	0.357
C1W40FA30LP10	0.000	-0.002	0.008	0.005	0.005	0.004	0.008	0.024	0.017	0.022	0.013	0.014	0.040	0.039
C5W40FA10LP10	0.000	-0.013	0.006	0.001	0.000	-0.001	0.016	0.023	0.027	0.021	0.020	0.018	0.051	0.043
C5W40FA30LP10	0.000	-0.009	0.013	-0.004	0.001	0.005	0.021	0.025	0.009	0.007	0.003	-0.003	0.019	0.006

ตารางที่ ก.3 ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่ความเข้มข้น 10%

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W55	0.000	0.005	0.015	0.043	0.199	0.354	0.771	1.159	1.562	1.930	2.198	2.440	2.734	2.899
C5W55	0.000	0.004	0.018	0.043	0.145	0.248	0.553	0.845	1.167	1.495	1.742	1.960	2.206	fail
C1W55FA20	0.000	0.002	0.008	0.015	0.043	0.071	0.238	0.489	0.819	1.276	1.639	1.919	2.214	fail
C1W55FA40	0.000	-0.008	-0.004	-0.001	0.001	0.004	0.013	0.018	0.012	0.029	0.038	0.025	0.052	0.042
C5W55FA20	0.000	0.003	0.012	0.023	0.104	0.186	0.453	0.725	0.957	1.240	1.470	1.678	2.033	fail
C5W55FA40	0.000	-0.006	0.015	0.009	0.057	0.105	0.306	0.494	0.655	0.763	0.860	0.945	1.232	1.373
C1W55LP10	0.000	0.012	0.040	0.132	0.518	0.905	1.486	1.854	2.127	2.374	2.606	2.748	3.008	fail
C5W55LP10	0.000	-0.002	0.015	0.026	0.118	0.211	0.468	0.704	0.928	1.141	1.325	1.464	1.694	1.810
C1W55FA10LP10	0.000	0.001	0.015	0.068	0.335	0.602	1.167	1.671	2.161	fail	fail	fail	fail	fail
C1W55FA30LP10	0.000	-0.017	-0.015	-0.009	-0.002	0.005	0.049	0.109	0.161	0.209	0.261	0.309	0.462	0.552
C5W55FA10LP10	0.000	0.000	0.007	0.023	0.105	0.187	0.425	0.654	0.830	1.032	1.223	1.404	1.689	1.855
C5W55FA30LP10	0.000	0.002	-0.001	0.007	0.015	0.024	0.040	0.054	0.055	0.080	0.064	0.069	0.131	0.140

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W40	0.000	0.001	0.002	0.015	0.037	0.058	0.126	0.220	0.296	0.376	0.458	0.530	0.651	0.728
C5W40	0.000	0.000	-0.001	0.008	0.013	0.018	0.025	0.042	0.047	0.048	0.058	0.053	0.079	0.075
C1W40FA20	0.000	0.001	-0.004	0.001	0.003	0.005	0.009	0.020	0.036	0.020	0.028	0.021	0.052	0.053
C1W40FA40	0.000	-0.017	-0.014	-0.014	-0.017	-0.020	-0.002	-0.009	0.005	-0.011	-0.012	-0.014	0.002	-0.007
C5W40FA20	0.000	0.000	-0.008	-0.002	0.001	0.004	0.018	0.043	0.039	0.048	0.055	0.066	0.118	0.134
C5W40FA40	0.000	-0.005	-0.009	-0.004	0.009	0.022	0.024	0.022	0.021	0.019	0.017	0.020	0.032	0.022
C1W40LP10	0.000	-0.002	0.001	0.011	0.068	0.125	0.404	0.807	1.296	1.881	2.372	2.820	fail	fail
C5W40LP10	0.000	0.008	0.002	0.012	0.027	0.042	0.119	0.227	0.335	0.465	0.588	0.711	0.924	1.083
C1W40FA10LP10	0.000	0.008	0.016	0.016	0.026	0.035	0.085	0.139	0.215	0.282	0.365	0.460	0.641	0.784
C1W40FA30LP10	0.000	-0.009	0.000	0.005	0.012	0.019	0.027	0.038	0.044	0.044	0.058	0.074	0.128	0.145
C5W40FA10LP10	0.000	-0.014	-0.003	-0.004	0.002	0.008	0.020	0.050	0.071	0.075	0.085	0.095	0.152	0.178
C5W40FA30LP10	0.000	-0.005	0.001	-0.001	0.000	0.001	0.018	0.019	0.011	0.015	0.003	-0.002	0.020	0.010

ตารางที่ ก.4 ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่ความเข้มข้น 15%

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W55	0.000	0.012	0.022	0.090	0.422	0.753	1.507	2.100	2.538	2.858	fail	fail	fail	fail
C5W55	0.000	0.012	0.024	0.067	0.197	0.327	0.651	0.993	1.369	1.705	1.981	2.208	2.511	fail
C1W55FA20	0.000	0.007	0.008	0.021	0.067	0.112	0.358	0.756	1.290	fail	fail	fail	fail	fail
C1W55FA40	0.000	0.002	-0.002	0.004	0.007	0.010	0.021	0.036	0.032	0.031	0.029	0.029	0.045	0.047
C5W55FA20	0.000	0.005	0.006	0.024	0.103	0.181	0.403	0.666	0.929	1.191	1.438	1.664	2.030	fail
C5W55FA40	0.000	0.000	-0.001	0.011	0.043	0.075	0.231	0.376	0.527	0.620	0.708	0.832	1.160	1.327
C1W55LP10	0.000	0.028	0.067	0.366	1.045	1.724	2.252	2.572	2.795	fail	fail	fail	fail	fail
C5W55LP10	0.000	0.009	0.021	0.067	0.224	0.381	0.701	1.001	1.241	1.461	1.643	1.801	2.053	2.205
C1W55FA10LP10	0.000	0.006	0.022	0.159	0.673	1.187	fail	fail	fail	fail	fail	fail	fail	fail
C1W55FA30LP10	0.000	-0.017	-0.022	-0.006	0.004	0.014	0.096	0.227	0.372	0.531	0.687	0.842	1.167	1.302
C5W55FA10LP10	0.000	-0.005	0.001	0.047	0.199	0.352	0.707	1.013	1.272	1.500	1.690	1.847	2.119	2.287
C5W55FA30LP10	0.000	0.000	0.006	0.009	0.017	0.025	0.038	0.057	0.071	0.082	0.076	0.083	0.142	0.139

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W40	0.000	0.010	0.002	0.022	0.072	0.121	0.320	0.559	0.777	1.005	1.228	1.435	1.680	fail
C5W40	0.000	-0.001	-0.001	0.014	0.015	0.015	0.034	0.056	0.064	0.073	0.089	0.101	0.124	0.140
C1W40FA20	0.000	-0.013	-0.011	0.001	0.005	0.009	0.009	0.022	0.021	0.022	0.025	0.028	0.059	0.049
C1W40FA40	0.000	-0.018	-0.018	-0.002	-0.009	-0.016	-0.005	0.010	0.002	0.003	0.001	-0.002	0.014	-0.007
C5W40FA20	0.000	-0.013	-0.010	0.005	0.008	0.011	0.086	0.156	0.237	0.348	0.415	0.513	0.711	0.746
C5W40FA40	0.000	-0.009	-0.011	0.008	0.005	0.002	0.039	0.017	0.028	0.016	0.005	0.009	0.006	-0.001
C1W40LP10	0.000	-0.011	-0.017	0.010	0.153	0.295	1.042	2.038	fail	fail	fail	fail	fail	fail
C5W40LP10	0.000	0.010	0.002	0.027	0.067	0.107	0.293	0.535	0.758	0.942	1.099	1.267	1.605	1.761
C1W40FA10LP10	0.000	0.005	0.009	0.025	0.033	0.042	0.111	0.242	0.381	0.547	0.719	0.938	1.371	1.784
C1W40FA30LP10	0.000	-0.001	-0.007	0.018	0.019	0.019	0.034	0.047	0.048	0.061	0.075	0.097	0.212	0.230
C5W40FA10LP10	0.000	-0.006	-0.006	0.021	0.017	0.013	0.037	0.069	0.092	0.119	0.139	0.165	0.214	0.265
C5W40FA30LP10	0.000	-0.010	-0.021	0.008	0.005	0.001	0.024	0.014	0.009	0.013	0.002	-0.001	0.008	-0.001

ตารางที่ ก.5 ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่ความเข้มข้น 20%

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W55	0.000	0.024	0.042	0.169	0.741	1.313	fail	fail	fail	fail	fail	fail	fail	fail
C5W55	0.000	0.008	0.016	0.058	0.180	0.301	0.625	0.940	1.285	1.598	1.865	2.115	2.407	fail
C1W55FA20	0.000	0.003	0.002	0.019	0.095	0.171	0.793	fail	fail	fail	fail	fail	fail	fail
C1W55FA40	0.000	0.000	0.001	0.012	0.008	0.003	0.021	0.033	0.027	0.032	0.030	0.026	0.055	0.055
C5W55FA20	0.000	0.006	0.007	0.031	0.123	0.215	0.505	0.815	1.118	1.377	1.604	1.810	2.084	2.252
C5W55FA40	0.000	-0.006	-0.006	0.005	0.024	0.042	0.142	0.281	0.446	0.569	0.666	0.854	1.167	1.378
C1W55LP10	0.000	0.020	0.081	0.545	1.386	2.228	fail	fail	fail	fail	fail	fail	fail	fail
C5W55LP10	0.000	0.000	0.017	0.068	0.216	0.365	0.728	1.038	1.275	1.460	1.610	1.750	1.950	2.076
C1W55FA10LP10	0.000	0.006	0.022	0.201	0.864	1.527	fail	fail	fail	fail	fail	fail	fail	fail
C1W55FA30LP10	0.000	-0.023	-0.025	-0.014	-0.002	0.011	0.227	fail	fail	fail	fail	fail	fail	fail
C5W55FA10LP10	0.000	0.000	0.012	0.053	0.226	0.399	0.811	1.165	1.464	1.699	1.885	2.046	fail	fail
C5W55FA30LP10	0.000	-0.003	-0.016	0.001	0.003	0.005	0.027	0.061	0.058	0.075	0.069	0.084	0.140	0.130

ตารางที่ ก.5 (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W40	0.000	-0.001	0.002	0.031	0.108	0.185	0.465	0.805	1.085	1.376	1.657	1.932	2.243	fail
C5W40	0.000	0.002	0.003	0.017	0.021	0.025	0.055	0.096	0.118	0.141	0.177	0.207	0.251	0.259
C1W40FA20	0.000	0.000	-0.004	0.011	0.013	0.015	0.026	0.034	0.037	0.023	0.028	0.032	0.065	0.050
C1W40FA40	0.000	0.000	-0.001	0.007	0.002	-0.003	0.009	0.024	0.015	0.015	0.014	0.013	0.029	-0.010
C5W40FA20	0.000	-0.002	-0.002	0.019	0.021	0.022	0.066	0.127	0.209	0.294	0.384	0.498	0.646	0.722
C5W40FA40	0.000	0.006	0.001	0.010	0.018	0.027	0.036	0.027	0.049	0.036	0.018	0.017	0.038	0.004
C1W40LP10	0.000	0.013	0.020	0.043	0.251	0.460	1.341	2.551	fail	fail	fail	fail	fail	fail
C5W40LP10	0.000	-0.009	-0.008	0.009	0.045	0.082	0.210	0.415	0.610	0.785	0.936	1.129	1.355	1.518
C1W40FA10LP10	0.000	0.028	0.016	0.034	0.059	0.083	0.220	0.410	0.616	0.872	1.127	1.468	1.893	2.223
C1W40FA30LP10	0.000	0.015	0.000	0.013	0.016	0.020	0.028	0.048	0.065	0.086	0.109	0.151	0.255	0.322
C5W40FA10LP10	0.000	-0.005	-0.006	0.007	0.005	0.004	0.045	0.075	0.125	0.152	0.172	0.206	0.281	0.304
C5W40FA30LP10	0.000	0.010	0.005	0.010	0.004	-0.002	0.022	0.024	0.017	0.021	0.019	0.012	0.031	0.000

ตารางที่ ก.6 ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (Mg_2SO_4) ที่ความเข้มข้น 1%

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W55	0.000	0.009	0.015	0.017	0.027	0.037	0.043	0.049	0.049	0.063	0.066	0.078	0.087	0.095
C5W55	0.000	0.002	0.002	0.013	0.017	0.021	0.019	0.025	0.035	0.043	0.040	0.048	0.054	0.066
C1W55FA20	0.000	-0.002	0.005	0.005	0.013	0.021	0.030	0.048	0.068	0.097	0.122	0.168	0.226	0.276
C1W55FA40	0.000	-0.003	0.004	0.003	0.012	0.021	0.022	0.026	0.031	0.034	0.036	0.039	0.046	0.056
C5W55FA20	0.000	-0.001	0.005	0.008	0.021	0.033	0.045	0.063	0.082	0.111	0.137	0.199	0.282	0.344
C5W55FA40	0.000	-0.005	0.003	0.009	0.027	0.044	0.099	0.164	0.208	0.282	0.332	0.402	0.469	0.530
C1W55LP10	0.000	-0.005	0.003	0.011	0.025	0.039	0.044	0.063	0.067	0.079	0.087	0.109	0.133	0.152
C5W55LP10	0.000	-0.008	-0.001	0.004	0.014	0.023	0.032	0.038	0.041	0.050	0.054	0.069	0.079	0.087
C1W55FA10LP10	0.000	-0.008	-0.001	0.011	0.020	0.028	0.049	0.074	0.096	0.123	0.137	0.178	0.224	0.258
C1W55FA30LP10	0.000	-0.020	-0.013	-0.012	-0.004	0.005	0.010	0.026	0.041	0.065	0.078	0.098	0.119	0.135
C5W55FA10LP10	0.000	-0.004	0.002	0.008	0.018	0.027	0.041	0.055	0.067	0.078	0.082	0.106	0.142	0.167
C5W55FA30LP10	0.000	0.003	0.008	0.014	0.024	0.034	0.027	0.034	0.046	0.086	0.082	0.106	0.127	0.141

ตารางที่ ก.6 (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W40	0.000	-0.003	0.000	0.001	0.007	0.012	0.017	0.021	0.026	0.027	0.027	0.037	0.043	0.044
C5W40	0.000	-0.002	0.001	0.002	0.006	0.009	0.013	0.014	0.019	0.017	0.015	0.023	0.025	0.022
C1W40FA20	0.000	-0.020	-0.020	-0.011	-0.001	0.009	-0.001	-0.008	0.003	0.002	-0.004	0.002	0.016	0.003
C1W40FA40	0.000	0.006	0.009	0.025	0.029	0.033	0.020	0.016	0.025	0.029	0.022	0.021	0.024	0.018
C5W40FA20	0.000	-0.027	-0.016	-0.015	-0.009	-0.004	0.008	-0.005	-0.001	0.007	0.007	0.007	0.016	0.014
C5W40FA40	0.000	-0.020	-0.015	-0.004	0.003	0.010	0.015	0.006	0.002	0.023	0.008	0.005	0.010	0.011
C1W40LP10	0.000	-0.004	0.002	0.009	0.010	0.012	0.015	0.017	0.031	0.032	0.024	0.035	0.044	0.041
C5W40LP10	0.000	-0.013	-0.002	0.002	0.006	0.010	0.007	0.026	0.017	0.019	0.019	0.033	0.059	0.049
C1W40FA10LP10	0.000	0.011	0.019	0.026	0.028	0.030	0.032	0.052	0.040	0.047	0.047	0.048	0.063	0.054
C1W40FA30LP10	0.000	-0.012	-0.004	0.002	0.007	0.013	0.006	0.009	0.011	0.010	0.008	0.014	0.018	0.011
C5W40FA10LP10	0.000	-0.014	-0.004	0.001	0.007	0.012	0.006	0.017	0.012	0.020	0.019	0.021	0.029	0.032
C5W40FA30LP10	0.000	-0.003	0.001	0.014	0.015	0.017	0.018	0.013	0.015	0.019	0.014	0.019	0.024	0.025

ตารางที่ ก.7 ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (Mg_2SO_4) ที่ความเข้มข้น 5%

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W55	0.000	0.003	0.014	0.015	0.025	0.036	0.061	0.140	0.216	0.414	0.596	0.857	1.101	1.257
C5W55	0.000	-0.007	0.001	0.005	0.017	0.029	0.049	0.124	0.199	0.503	0.784	1.208	1.629	1.793
C1W55FA20	0.000	0.000	0.007	0.008	0.016	0.023	0.036	0.155	0.255	0.449	0.598	0.818	1.056	1.261
C1W55FA40	0.000	-0.003	0.003	0.003	0.009	0.016	0.017	0.025	0.029	0.044	0.053	0.065	0.085	0.097
C5W55FA20	0.000	0.002	0.013	0.016	0.034	0.052	0.095	0.322	0.465	0.739	0.937	1.249	1.606	1.779
C5W55FA40	0.000	-0.003	0.001	0.004	0.052	0.101	0.190	0.701	1.122	1.575	1.819	2.117	2.406	2.628
C1W55LP10	0.000	-0.003	0.012	0.016	0.041	0.067	0.122	0.272	0.358	0.549	0.675	0.823	0.946	1.033
C5W55LP10	0.000	-0.005	0.005	0.010	0.023	0.036	0.056	0.113	0.152	0.259	0.340	0.441	0.543	0.587
C1W55FA10LP10	0.000	-0.007	0.003	0.012	0.045	0.077	0.152	0.379	0.514	0.769	0.958	1.205	1.431	1.590
C1W55FA30LP10	0.000	-0.026	-0.029	-0.022	-0.011	-0.001	0.032	0.223	0.343	0.522	0.630	0.764	0.897	0.991
C5W55FA10LP10	0.000	-0.009	0.002	0.015	0.029	0.042	0.078	0.196	0.252	0.376	0.455	0.575	0.705	0.782
C5W55FA30LP10	0.000	-0.020	-0.009	-0.002	0.011	0.023	0.029	0.107	0.169	0.308	0.386	0.519	0.665	0.762

ตารางที่ ก.7 (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W40	0.000	-0.011	-0.004	-0.002	0.006	0.013	0.018	0.028	0.042	0.069	0.102	0.200	0.356	0.502
C5W40	0.000	-0.006	-0.001	0.003	0.010	0.017	0.023	0.030	0.039	0.051	0.059	0.081	0.104	0.114
C1W40FA20	0.000	-0.012	-0.008	-0.007	-0.002	0.004	0.005	0.006	0.009	0.010	0.009	0.012	0.015	0.008
C1W40FA40	0.000	0.015	0.019	0.023	0.027	0.030	0.032	0.032	0.035	0.034	0.032	0.036	0.045	0.032
C5W40FA20	0.000	-0.011	-0.010	-0.005	0.005	0.015	0.019	0.016	0.030	0.048	0.052	0.117	0.248	0.415
C5W40FA40	0.000	-0.010	0.001	-0.004	0.002	0.008	0.019	0.015	0.018	0.018	0.018	0.028	0.026	0.019
C1W40LP10	0.000	-0.001	0.003	0.028	0.033	0.037	0.042	0.123	0.209	0.421	0.628	0.994	1.367	1.633
C5W40LP10	0.000	-0.007	-0.001	-0.002	0.014	0.030	0.040	0.068	0.126	0.302	0.483	0.789	1.149	1.421
C1W40FA10LP10	0.000	0.014	0.031	0.021	0.036	0.051	0.041	0.078	0.084	0.134	0.183	0.289	0.452	0.678
C1W40FA30LP10	0.000	0.004	0.001	-0.004	0.010	0.025	0.035	0.015	0.018	0.017	0.024	0.025	0.031	0.107
C5W40FA10LP10	0.000	-0.016	-0.003	-0.005	0.004	0.014	0.013	0.021	0.028	0.059	0.072	0.146	0.281	0.473
C5W40FA30LP10	0.000	-0.001	-0.005	-0.011	0.001	0.012	0.021	0.011	0.028	0.016	0.010	0.014	0.024	0.032

ตารางที่ ก.8 ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (Mg_2SO_4) ที่ความเข้มข้น 10%

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W55	0.000	0.009	0.004	0.024	0.026	0.028	0.041	0.106	0.177	0.317	0.447	0.685	0.967	1.209
C5W55	0.000	-0.009	-0.023	0.006	0.022	0.038	0.030	0.166	0.314	0.619	0.862	1.190	1.511	1.690
C1W55FA20	0.000	-0.004	-0.013	0.009	0.016	0.023	0.032	0.161	0.308	0.542	0.750	1.101	1.485	1.832
C1W55FA40	0.000	-0.004	-0.009	0.009	0.010	0.011	0.013	0.017	0.021	0.029	0.035	0.060	0.112	0.183
C5W55FA20	0.000	0.000	-0.018	0.014	0.024	0.033	0.063	0.643	1.040	1.343	1.526	1.755	1.995	fail
C5W55FA40	0.000	-0.006	-0.022	0.006	0.022	0.037	0.096	fail	fail	fail	fail	fail	fail	fail
C1W55LP10	0.000	0.008	-0.010	0.014	0.025	0.036	0.073	0.296	0.418	0.564	0.651	0.780	0.925	1.026
C5W55LP10	0.000	-0.010	-0.018	0.011	0.021	0.030	0.037	0.140	0.204	0.279	0.302	0.362	0.428	0.473
C1W55FA10LP10	0.000	-0.007	-0.010	0.013	0.029	0.045	0.101	0.585	0.839	1.108	1.266	1.488	1.724	1.951
C1W55FA30LP10	0.000	-0.025	-0.035	-0.009	-0.005	0.000	0.012	0.484	0.808	1.152	1.423	1.896	2.568	fail
C5W55FA10LP10	0.000	-0.007	-0.025	0.011	0.022	0.032	0.055	0.276	0.401	0.516	0.581	0.680	0.793	0.897
C5W55FA30LP10	0.000	-0.030	-0.043	-0.010	-0.009	-0.008	0.001	0.252	0.603	1.108	1.467	fail	fail	fail

ตารางที่ ก.8 (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W40	0.000	-0.019	-0.018	0.000	0.000	0.000	0.011	0.018	0.021	0.037	0.050	0.142	0.320	0.478
C5W40	0.000	-0.004	0.005	0.013	0.015	0.017	0.021	0.023	0.025	0.030	0.028	0.041	0.063	0.084
C1W40FA20	0.000	-0.007	-0.005	0.005	0.007	0.009	0.013	0.010	0.011	0.015	0.012	0.019	0.026	0.029
C1W40FA40	0.000	0.033	0.032	0.037	0.038	0.038	0.042	0.039	0.039	0.040	0.038	0.045	0.048	0.041
C5W40FA20	0.000	-0.006	0.003	0.012	0.020	0.029	0.024	0.025	0.034	0.089	0.132	0.397	0.982	fail
C5W40FA40	0.000	-0.013	-0.002	0.006	0.008	0.010	0.012	0.007	0.009	0.011	0.005	0.015	0.021	fail
C1W40LP10	0.000	-0.004	-0.004	0.016	0.030	0.044	0.028	0.091	0.191	0.494	0.811	1.385	1.888	2.311
C5W40LP10	0.000	-0.008	0.003	0.007	0.014	0.021	0.030	0.074	0.227	0.641	0.968	1.525	2.017	fail
C1W40FA10LP10	0.000	0.013	0.014	0.035	0.038	0.041	0.041	0.050	0.101	0.323	0.612	1.168	1.709	2.251
C1W40FA30LP10	0.000	-0.014	-0.008	-0.001	0.006	0.014	0.011	0.008	0.011	0.025	0.024	0.076	0.100	0.153
C5W40FA10LP10	0.000	-0.018	-0.012	0.005	0.009	0.013	0.017	0.036	0.021	0.032	0.037	0.158	0.248	0.381
C5W40FA30LP10	0.000	-0.012	-0.006	-0.001	0.013	0.026	0.028	0.010	0.020	0.012	0.007	0.023	0.025	0.016

ตารางที่ ก.9 ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (Mg_2SO_4) ที่ความเข้มข้น 15%

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W55	0.000	0.009	0.006	0.025	0.028	0.031	0.040	0.093	0.161	0.425	0.813	1.515	1.972	fail
C5W55	0.000	-0.002	-0.017	0.010	0.019	0.027	0.042	0.303	0.920	2.219	fail	fail	fail	fail
C1W55FA20	0.000	-0.003	-0.005	0.008	0.013	0.019	0.028	0.243	0.571	1.361	2.099	3.259	fail	fail
C1W55FA40	0.000	-0.007	-0.002	0.006	0.009	0.012	0.015	0.016	0.014	0.018	0.015	0.020	0.027	0.072
C5W55FA20	0.000	0.003	-0.010	0.014	0.023	0.032	0.050	1.902	fail	fail	fail	fail	fail	fail
C5W55FA40	0.000	-0.007	-0.019	0.004	0.017	0.030	0.076	fail	fail	fail	fail	fail	fail	fail
C1W55LP10	0.000	-0.004	-0.002	0.014	0.021	0.028	0.049	0.202	0.357	0.646	0.866	1.189	1.394	1.507
C5W55LP10	0.000	-0.007	-0.008	0.004	0.011	0.019	0.031	0.109	0.198	0.441	0.650	0.914	1.083	1.146
C1W55FA10LP10	0.000	-0.006	0.013	0.009	0.019	0.029	0.071	0.530	1.021	1.756	fail	fail	fail	fail
C1W55FA30LP10	0.000	-0.018	-0.021	-0.011	-0.005	0.001	0.012	0.652	1.391	fail	fail	fail	fail	fail
C5W55FA10LP10	0.000	-0.020	-0.022	-0.013	-0.001	0.011	0.039	0.348	0.579	0.944	1.222	1.657	2.298	3.160
C5W55FA30LP10	0.000	0.012	-0.010	0.003	0.009	0.015	0.032	0.698	1.903	fail	fail	fail	fail	fail

ตารางที่ ก.9 (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W40	0.000	-0.016	-0.015	-0.005	-0.003	-0.002	0.004	0.007	0.010	0.011	0.018	0.055	0.111	0.192
C5W40	0.000	0.009	0.006	0.007	0.010	0.012	0.025	0.019	0.021	0.032	0.052	0.082	0.185	fail
C1W40FA20	0.000	-0.013	-0.003	-0.001	0.000	0.001	-0.003	0.003	-0.003	0.011	0.035	0.181	fail	fail
C1W40FA40	0.000	0.019	0.018	0.022	0.030	0.038	0.032	0.030	0.023	0.021	0.027	0.027	0.033	0.027
C5W40FA20	0.000	0.007	0.004	0.017	0.020	0.023	0.019	0.032	0.018	0.036	0.106	fail	fail	fail
C5W40FA40	0.000	-0.004	0.001	0.014	0.011	0.009	0.013	0.014	0.010	0.027	fail	fail	fail	fail
C1W40LP10	0.000	0.004	0.012	0.018	0.020	0.023	0.032	0.119	0.417	1.425	2.489	fail	fail	fail
C5W40LP10	0.000	0.004	-0.011	0.007	0.009	0.011	0.033	0.063	0.181	0.595	1.059	fail	fail	fail
C1W40FA10LP10	0.000	0.024	0.028	0.040	0.043	0.047	0.037	0.064	0.118	0.362	0.724	1.514	fail	fail
C1W40FA30LP10	0.000	0.002	0.016	0.011	0.017	0.023	0.017	0.013	0.006	0.011	0.001	0.016	0.016	0.010
C5W40FA10LP10	0.000	-0.014	-0.017	-0.005	0.005	0.014	0.006	0.006	0.001	0.035	0.022	0.095	0.206	0.431
C5W40FA30LP10	0.000	0.007	-0.002	-0.002	0.014	0.031	0.011	0.019	0.008	0.015	0.002	0.011	0.018	0.020

ตารางที่ ก.10 ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (Mg_2SO_4) ที่ความเข้มข้น 20%

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W55	0.000	0.003	0.000	0.009	0.018	0.026	0.028	0.058	0.098	0.326	0.814	fail	fail	fail
C5W55	0.000	-0.005	-0.014	0.004	0.011	0.019	0.032	0.095	0.335	fail	fail	fail	fail	fail
C1W55FA20	0.000	-0.003	-0.010	0.001	0.009	0.017	0.043	0.184	0.581	fail	fail	fail	fail	fail
C1W55FA40	0.000	-0.008	-0.008	0.001	0.006	0.011	0.016	0.031	0.123	fail	fail	fail	fail	fail
C5W55FA20	0.000	-0.001	-0.011	0.004	0.016	0.029	0.048	1.020	fail	fail	fail	fail	fail	fail
C5W55FA40	0.000	-0.011	-0.019	-0.003	0.010	0.024	0.060	fail	fail	fail	fail	fail	fail	fail
C1W55LP10	0.000	-0.004	-0.003	0.006	0.016	0.026	0.041	0.135	0.257	0.666	1.128	1.582	1.739	1.764
C5W55LP10	0.000	-0.008	-0.004	-0.004	0.004	0.012	0.024	0.081	0.146	0.616	1.078	1.565	2.089	fail
C1W55FA10LP10	0.000	-0.004	-0.012	0.004	0.007	0.011	0.046	0.531	1.182	fail	fail	fail	fail	fail
C1W55FA30LP10	0.000	-0.022	-0.027	-0.011	-0.011	-0.010	0.007	0.511	fail	fail	fail	fail	fail	fail
C5W55FA10LP10	0.000	-0.009	-0.019	0.010	0.011	0.013	0.047	0.496	1.042	fail	fail	fail	fail	Fail
C5W55FA30LP10	0.000	-0.004	-0.020	0.003	0.003	0.003	0.028	0.891	fail	fail	fail	fail	fail	fail

ตารางที่ ก.10 (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W40	0.000	-0.008	-0.010	-0.011	-0.002	0.007	0.019	0.017	0.009	0.015	0.036	0.075	0.162	0.249
C5W40	0.000	0.006	-0.003	0.005	0.006	0.006	0.025	0.031	0.077	0.200	0.392	fail	fail	fail
C1W40FA20	0.000	0.001	-0.019	-0.016	-0.018	-0.020	-0.008	-0.008	0.009	0.105	fail	fail	fail	fail
C1W40FA40	0.000	0.035	0.032	0.032	0.031	0.029	0.044	0.035	0.034	0.032	0.028	0.036	0.043	0.049
C5W40FA20	0.000	-0.012	-0.016	-0.008	-0.009	-0.009	0.000	-0.006	-0.006	0.002	-0.002	fail	fail	fail
C5W40FA40	0.000	0.002	0.009	-0.002	0.000	0.002	0.039	0.016	0.008	0.039	fail	fail	fail	fail
C1W40LP10	0.000	0.009	0.016	0.009	0.012	0.015	0.058	0.086	0.311	1.438	2.831	fail	fail	fail
C5W40LP10	0.000	0.011	-0.013	0.001	0.003	0.005	0.026	0.032	0.048	0.148	0.315	1.139	fail	fail
C1W40FA10LP10	0.000	0.019	0.027	0.021	0.023	0.026	0.043	0.049	0.093	0.276	0.586	fail	fail	fail
C1W40FA30LP10	0.000	-0.006	-0.006	-0.008	-0.004	0.000	0.010	0.016	0.045	fail	fail	fail	fail	fail
C5W40FA10LP10	0.000	-0.005	0.005	-0.010	-0.002	0.007	0.005	0.028	0.012	0.006	0.021	0.010	0.085	0.250
C5W40FA30LP10	0.000	0.000	-0.001	-0.008	0.000	0.008	0.027	0.015	0.007	0.007	0.028	0.007	0.018	0.040

ภาคผนวก ข

ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (Mg_2SO_4)

ตารางที่ ข.1 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (Mg_2SO_4) ที่ความเข้มข้น 1%

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W55	0.000	-0.17	-0.60	-0.71	-0.58	-0.64	-0.81	-1.13	-0.97	-1.21	-1.18	-1.35	-1.61	-1.63
C5W55	0.000	-0.19	-0.68	-0.82	-0.74	-0.83	-1.07	-1.62	-1.43	-1.79	-1.78	-1.96	-2.22	-2.30
C1W55FA20	0.000	-0.10	-0.46	-0.55	-0.47	-0.50	-0.57	-0.89	-0.78	-1.00	-0.96	-1.10	-1.33	-1.38
C1W55FA40	0.000	0.06	-0.18	-0.24	-0.15	-0.16	-0.20	-0.46	-0.24	-0.59	-0.50	-0.53	-0.76	-0.75
C5W55FA20	0.000	-0.11	-0.47	-0.56	-0.51	-0.54	-0.64	-1.00	-0.85	-1.13	-1.14	-1.28	-1.57	-1.66
C5W55FA40	0.000	-0.05	-0.33	-0.39	-0.36	-0.39	-0.45	-0.78	-0.61	-0.92	-0.89	-0.97	-1.27	-1.33
C1W55LP10	0.000	-0.19	-0.51	-0.60	-0.53	-0.58	-0.73	-1.13	-0.97	-1.12	-1.16	-1.31	-1.54	-1.59
C5W55LP10	0.000	-0.16	-0.53	-0.64	-0.57	-0.63	-0.81	-1.24	-1.05	-1.24	-1.30	-1.39	-1.63	-1.70
C1W55FA10LP10	0.000	-0.07	-0.41	-0.51	-0.40	-0.45	-0.56	-0.93	-0.80	-1.01	-1.05	-1.21	-1.49	-1.54
C1W55FA30LP10	0.000	-0.03	-0.34	-0.42	-0.27	-0.30	-0.36	-0.74	-0.49	-0.80	-0.72	-0.85	-1.11	-1.16
C5W55FA10LP10	0.000	-0.02	-0.41	-0.51	-0.38	-0.40	-0.44	-0.83	-0.72	-0.82	-0.84	-1.02	-1.26	-1.30
C5W55FA30LP10	0.000	0.02	-0.32	-0.41	-0.31	-0.34	-0.41	-0.81	-0.61	-0.82	-0.77	-1.00	-1.18	-1.28

ตารางที่ ข.6 (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W40	0.000	-0.03	-0.18	-0.24	-0.17	-0.18	-0.20	-0.32	-0.29	-0.39	-0.41	-0.45	-0.58	-0.59
C5W40	0.000	-0.07	-0.26	-0.32	-0.27	-0.27	-0.27	-0.41	-0.37	-0.37	-0.37	-0.33	-0.42	-0.40
C1W40FA20	0.000	-0.17	-0.35	-0.41	-0.33	-0.33	-0.31	-0.54	-0.45	-0.61	-0.60	-0.63	-0.78	-0.80
C1W40FA40	0.000	-0.21	-0.40	-0.46	-0.31	-0.30	-0.30	-0.45	-0.32	-0.53	-0.51	-0.46	-0.69	-0.68
C5W40FA20	0.000	-0.11	-0.25	-0.37	-0.31	-0.33	-0.36	-0.56	-0.48	-0.64	-0.62	-0.63	-0.79	-0.79
C5W40FA40	0.000	0.03	-0.25	-0.25	-0.08	-0.08	-0.10	-0.27	-0.17	-0.39	-0.35	-0.31	-0.52	-0.50
C1W40LP10	0.000	-0.22	-0.50	-0.58	-0.49	-0.46	-0.40	-0.60	-0.49	-0.60	-0.59	-0.65	-0.83	-0.85
C5W40LP10	0.000	-0.17	-0.42	-0.50	-0.44	-0.44	-0.45	-0.63	-0.56	-0.64	-0.63	-0.61	-0.78	-0.78
C1W40FA10LP10	0.000	-0.12	-0.40	-0.50	-0.40	-0.40	-0.40	-0.65	-0.55	-0.69	-0.68	-0.71	-0.92	-0.93
C1W40FA30LP10	0.000	-0.03	-0.23	-0.30	-0.16	-0.18	-0.22	-0.41	-0.33	-0.56	-0.50	-0.49	-0.73	-0.71
C5W40FA10LP10	0.000	-0.17	-0.47	-0.55	-0.47	-0.47	-0.49	-0.74	-0.62	-0.74	-0.70	-0.70	-0.85	-0.85
C5W40FA30LP10	0.000	0.15	-0.14	-0.23	-0.08	-0.09	-0.11	-0.28	-0.19	-0.39	-0.32	-0.32	-0.51	-0.52

ตารางที่ ข.7 ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (Mg_2SO_4) ที่ความเข้มข้น 5%

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W55	0.000	0.06	-0.09	-0.19	0.09	0.07	0.02	-0.19	0.06	-0.26	-0.02	-0.11	-0.14	0.49
C5W55	0.000	0.02	-0.21	-0.36	-0.01	-0.03	-0.11	-0.44	0.10	-0.03	0.47	1.12	3.42	2.50
C1W55FA20	0.000	0.05	-0.07	-0.16	0.29	0.27	0.22	0.01	0.39	0.00	0.29	0.27	0.52	1.22
C1W55FA40	0.000	0.10	-0.03	-0.12	0.44	0.42	0.38	0.28	0.80	0.54	1.02	1.22	2.04	3.05
C5W55FA20	0.000	0.05	-0.15	-0.24	0.23	0.20	0.14	-0.08	0.22	0.04	0.60	0.93	2.38	3.91
C5W55FA40	0.000	0.07	-0.08	-0.14	0.17	0.14	0.05	-0.07	0.59	0.98	2.99	4.99	10.90	17.37
C1W55LP10	0.000	0.20	0.06	-0.01	0.46	0.44	0.39	0.11	0.35	-0.04	0.21	0.10	-0.27	-0.10
C5W55LP10	0.000	0.20	-0.04	-0.16	0.17	0.15	0.08	-0.20	0.14	-0.09	0.15	0.53	1.70	3.80
C1W55FA10LP10	0.000	0.26	0.06	-0.02	0.38	0.36	0.31	0.05	0.37	0.01	0.28	0.15	0.10	0.81
C1W55FA30LP10	0.000	0.22	0.04	-0.03	0.38	0.37	0.34	0.15	0.51	0.07	0.46	0.68	1.18	2.15
C5W55FA10LP10	0.000	0.40	0.27	0.20	0.53	0.51	0.47	0.26	0.67	0.52	0.87	0.83	1.86	3.94
C5W55FA30LP10	0.000	0.26	0.14	0.09	0.46	0.44	0.39	0.26	0.58	0.37	0.62	1.42	2.59	3.65

ตารางที่ ข.7 (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W40	0.000	0.26	0.24	0.18	0.37	0.35	0.30	0.23	0.32	0.14	0.24	0.16	0.07	0.39
C5W40	0.000	0.14	0.18	0.19	0.41	0.42	0.43	0.36	0.51	0.31	0.44	0.57	1.04	1.76
C1W40FA20	0.000	0.15	0.09	0.06	0.23	0.21	0.17	0.06	0.17	-0.05	0.07	0.02	0.05	0.38
C1W40FA40	0.000	0.12	0.05	0.02	0.24	0.23	0.19	0.07	0.18	-0.11	0.02	-0.01	-0.21	1.35
C5W40FA20	0.000	0.12	0.09	0.09	0.26	0.25	0.23	0.14	0.33	0.09	0.26	0.25	0.42	0.99
C5W40FA40	0.000	0.12	0.11	0.11	0.28	0.27	0.24	0.14	0.32	0.04	0.13	0.11	-0.01	2.03
C1W40LP10	0.000	0.23	0.25	0.23	0.45	0.43	0.38	0.24	0.40	0.12	0.29	0.19	0.11	0.38
C5W40LP10	0.000	0.16	0.20	0.21	0.43	0.42	0.41	0.30	0.49	0.22	0.33	0.39	0.82	1.56
C1W40FA10LP10	0.000	0.22	0.20	0.17	0.43	0.40	0.35	0.19	0.37	0.11	0.29	0.17	0.21	0.85
C1W40FA30LP10	0.000	0.22	0.12	0.09	0.29	0.27	0.20	0.07	0.24	-0.07	0.09	0.01	-0.06	0.28
C5W40FA10LP10	0.000	0.21	0.17	0.15	0.39	0.38	0.35	0.23	0.42	0.16	0.33	0.19	0.21	0.92
C5W40FA30LP10	0.000	0.32	0.22	0.21	0.52	0.50	0.46	0.33	0.51	0.23	0.39	0.32	0.20	0.31

ตารางที่ ข.8 ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (Mg_2SO_4) ที่ความเข้มข้น10%

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W55	0.000	0.25	0.03	0.04	0.72	0.67	0.54	0.42	1.18	1.25	0.91	0.61	2.65	4.94
C5W55	0.000	0.26	-0.03	-0.04	0.83	0.79	0.67	0.56	1.47	1.62	1.48	1.26	4.73	7.16
C1W55FA20	0.000	0.36	0.13	0.18	1.00	0.96	0.84	0.76	1.50	1.67	1.42	0.89	3.02	6.61
C1W55FA40	0.000	0.35	0.08	0.08	1.41	1.36	1.23	1.19	2.73	3.28	4.66	5.64	8.61	20.00
C5W55FA20	0.000	0.39	0.20	0.24	1.14	1.10	0.97	0.84	1.63	2.07	3.76	5.43	10.63	17.69
C5W55FA40	0.000	0.35	0.11	0.12	1.01	0.97	0.85	0.88	3.52	4.86	27.93	30.57	39.19	44.52
C1W55LP10	0.000	0.55	0.47	0.51	1.23	1.21	1.16	0.97	1.60	1.76	1.25	1.07	2.56	4.34
C5W55LP10	0.000	0.50	0.33	0.35	0.94	0.92	0.84	0.66	1.31	1.47	1.22	0.79	3.83	5.91
C1W55FA10LP10	0.000	0.59	0.53	0.55	1.28	1.26	1.20	1.12	1.55	1.82	1.38	1.57	3.32	4.97
C1W55FA30LP10	0.000	0.44	0.31	0.36	1.14	1.14	1.12	1.00	1.54	1.93	1.99	1.34	4.47	9.01
C5W55FA10LP10	0.000	0.73	0.61	0.65	1.48	1.46	1.40	1.26	2.08	2.23	1.86	1.98	3.77	10.89
C5W55FA30LP10	0.000	0.54	0.44	0.45	1.46	1.43	1.37	1.23	2.37	2.71	2.93	4.54	8.38	12.76

ตารางที่ ข.8 (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W40	0.000	0.64	0.60	0.64	0.99	0.96	0.86	0.76	1.37	1.57	2.68	5.06	11.32	7.42
C5W40	0.000	0.57	0.64	0.69	1.12	1.08	0.95	0.83	1.81	1.93	2.12	2.79	7.94	11.33
C1W40FA20	0.000	0.57	0.52	0.61	1.00	0.96	0.85	0.73	1.50	1.38	1.88	2.60	6.38	9.18
C1W40FA40	0.000	0.56	0.54	0.64	1.14	1.12	1.08	0.94	1.71	1.59	2.18	2.08	4.89	15.00
C5W40FA20	0.000	0.39	0.33	0.42	0.84	0.81	0.72	0.61	1.29	1.36	2.62	3.92	8.26	11.68
C5W40FA40	0.000	0.48	0.34	0.40	0.86	0.84	0.78	0.66	1.32	1.21	4.48	6.59	9.18	15.10
C1W40LP10	0.000	0.39	0.20	0.26	0.62	0.57	0.43	0.27	1.53	1.57	2.65	5.49	10.07	6.01
C5W40LP10	0.000	0.49	0.46	0.53	0.95	0.90	0.74	0.58	1.78	1.84	1.71	3.38	8.30	9.21
C1W40FA10LP10	0.000	0.49	0.32	0.37	0.82	0.77	0.63	0.44	1.49	1.54	1.76	2.74	5.41	6.55
C1W40FA30LP10	0.000	0.41	0.19	0.25	0.74	0.69	0.55	0.40	1.36	1.32	1.20	1.35	3.40	6.96
C5W40FA10LP10	0.000	0.55	0.46	0.55	1.08	1.04	0.93	0.80	1.88	1.88	2.01	3.78	6.21	10.77
C5W40FA30LP10	0.000	0.65	0.53	0.62	1.22	1.19	1.11	1.00	1.88	1.77	1.76	1.53	3.34	10.86

ตารางที่ ข.9 ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (Mg_2SO_4) ที่ความเข้มข้น15%

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W55	0.000	0.31	-0.12	-0.10	0.45	0.43	0.40	0.14	1.08	1.55	3.14	4.81	10.66	14.33
C5W55	0.000	0.34	-0.23	-0.23	0.40	0.38	0.32	0.02	1.66	1.98	8.41	10.61	16.23	24.32
C1W55FA20	0.000	0.34	-0.08	-0.04	0.65	0.64	0.61	0.35	2.59	3.55	6.62	10.79	18.80	22.41
C1W55FA40	0.000	0.39	-0.12	-0.13	0.88	0.85	0.77	0.91	7.78	11.11	15.61	21.70	31.29	35.08
C5W55FA20	0.000	0.45	-0.02	0.00	0.78	0.77	0.74	0.45	2.95	3.80	27.37	38.10	52.14	62.70
C5W55FA40	0.000	0.34	-0.05	-0.03	0.57	0.61	0.70	1.28	16.77	21.24	48.60	63.12	77.46	86.56
C1W55LP10	0.000	0.80	0.51	0.54	1.18	1.19	1.24	0.94	1.55	1.89	2.00	2.92	8.24	15.00
C5W55LP10	0.000	0.58	0.22	0.26	0.74	0.74	0.75	0.45	1.45	1.79	3.05	4.23	10.86	17.15
C1W55FA10LP10	0.000	0.73	0.40	0.45	1.03	1.01	0.96	0.70	2.18	2.76	4.85	8.12	18.78	23.84
C1W55FA30LP10	0.000	0.62	0.27	0.31	1.03	1.01	0.95	0.67	3.31	4.35	10.20	16.47	24.15	28.35
C5W55FA10LP10	0.000	0.87	0.47	0.51	1.10	1.07	1.01	0.72	2.09	2.83	5.06	7.63	17.32	29.30
C5W55FA30LP10	0.000	0.71	0.37	0.39	1.09	1.08	1.06	0.83	4.03	5.37	13.15	17.22	25.07	30.36

ตารางที่ ข.9 (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W40	0.000	0.38	0.31	0.34	0.69	0.66	0.57	0.33	1.25	1.30	8.55	12.50	17.58	19.04
C5W40	0.000	0.43	0.44	0.46	0.83	0.80	0.72	0.47	1.73	1.87	6.03	12.03	18.21	23.32
C1W40FA20	0.000	0.36	0.25	0.28	0.60	0.56	0.46	0.08	0.85	0.63	5.64	13.37	20.61	24.98
C1W40FA40	0.000	0.39	0.21	0.25	0.61	0.57	0.47	0.18	2.01	2.45	6.60	8.82	13.58	28.00
C5W40FA20	0.000	0.37	0.24	0.25	0.63	0.60	0.51	0.30	1.72	2.39	12.71	17.17	29.22	38.32
C5W40FA40	0.000	0.43	0.17	0.16	0.54	0.51	0.45	0.20	1.55	1.72	9.64	13.23	25.67	48.83
C1W40LP10	0.000	0.47	0.24	0.23	0.69	0.66	0.59	0.33	1.50	1.75	8.71	11.81	16.43	19.81
C5W40LP10	0.000	0.59	0.51	0.48	0.94	0.92	0.86	0.63	1.84	2.14	8.38	12.44	18.29	20.59
C1W40FA10LP10	0.000	0.63	0.36	0.36	0.87	0.84	0.77	0.48	1.76	1.68	5.53	10.01	16.64	21.63
C1W40FA30LP10	0.000	0.37	0.10	0.09	0.50	0.47	0.38	0.11	1.64	1.35	4.34	7.38	15.54	22.02
C5W40FA10LP10	0.000	0.47	0.24	0.23	0.70	0.66	0.57	0.31	1.65	1.80	5.55	4.17	23.15	28.00
C5W40FA30LP10	0.000	0.69	0.62	0.70	1.26	1.26	1.26	1.05	2.19	2.56	4.39	7.76	15.49	28.67

ตารางที่ ข.10 ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (Mg_2SO_4) ที่ความเข้มข้น 20%

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C1W55	0.000	0.40	0.05	-0.05	0.85	0.89	1.01	0.92	2.51	2.72	7.85	11.52	19.56	27.17
C5W55	0.000	0.43	-0.09	-0.21	0.57	0.62	0.75	0.69	2.75	3.18	13.91	21.41	36.80	40.00
C1W55FA20	0.000	0.42	0.07	-0.03	0.87	0.90	0.96	1.04	5.00	5.79	15.57	20.18	28.82	35.14
C1W55FA40	0.000	0.40	-0.11	-0.24	1.50	1.54	1.63	2.61	14.86	16.99	28.51	33.73	42.38	49.04
C5W55FA20	0.000	0.49	0.08	-0.04	0.84	0.85	0.86	0.87	4.72	6.05	40.49	56.26	71.25	81.99
C5W55FA40	0.000	0.25	-0.16	-0.23	0.53	0.61	0.82	2.13	25.21	31.32	62.48	79.22	91.44	97.31
C1W55LP10	0.000	0.70	0.46	0.37	1.06	1.10	1.19	0.88	1.72	1.97	5.42	8.77	13.91	18.08
C5W55LP10	0.000	0.31	-0.15	-0.25	0.39	0.40	0.45	0.19	1.55	2.01	7.09	10.62	18.20	25.85
C1W55FA10LP10	0.000	0.61	0.24	0.10	0.91	0.92	0.95	0.85	3.27	3.87	12.69	21.83	30.22	37.09
C1W55FA30LP10	0.000	0.59	0.16	0.05	1.16	1.14	1.07	1.21	5.62	7.94	20.82	26.83	34.85	40.19
C5W55FA10LP10	0.000	0.82	0.51	0.45	1.22	1.23	1.26	1.16	3.46	4.14	13.00	22.71	34.25	44.28

ตารางที่ ข.10 (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (สัปดาห์)													
	1	2	4	8	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80
C5W55FA30LP10	0.000	0.66	0.31	0.24	1.32	1.31	1.31	1.41	7.68	10.68	24.59	33.27	43.73	51.22
C1W40	0.000	0.30	0.35	0.25	0.81	0.80	0.77	0.62	1.57	1.69	8.74	12.56	17.98	22.61
C5W40	0.000	0.39	0.45	0.32	0.95	0.93	0.86	0.70	2.07	2.26	8.39	14.85	21.86	29.14
C1W40FA20	0.000	0.07	0.03	-0.10	0.54	0.51	0.43	0.20	0.75	0.81	8.57	15.73	22.50	27.99
C1W40FA40	0.000	0.12	0.11	-0.02	0.65	0.62	0.54	0.35	3.67	4.58	11.62	16.96	25.19	31.96
C5W40FA20	0.000	0.37	0.29	0.19	0.89	0.86	0.79	0.70	2.72	3.31	15.57	24.91	36.96	47.62
C5W40FA40	0.000	0.39	0.23	0.09	0.76	0.74	0.69	0.42	3.08	3.80	15.16	23.97	37.27	59.13
C1W40LP10	0.000	0.35	0.15	0.00	0.83	0.80	0.73	0.53	1.74	1.69	9.14	11.75	17.02	21.77
C5W40LP10	0.000	0.42	0.32	0.15	0.91	0.87	0.78	0.59	2.06	2.61	11.66	16.98	24.07	26.64
C1W40FA10LP10	0.000	0.36	0.10	-0.04	0.84	0.81	0.75	0.57	1.92	2.42	10.05	13.85	20.19	25.11
C1W40FA30LP10	0.000	0.11	-0.12	-0.32	0.61	0.56	0.44	0.19	2.35	3.08	10.71	16.00	22.07	27.63
C5W40FA10LP10	0.000	0.32	0.16	0.02	0.76	0.75	0.74	0.58	2.05	2.62	11.49	18.55	26.48	32.70
C5W40FA30LP10	0.000	0.28	0.27	0.13	0.78	0.77	0.74	0.56	2.95	3.61	11.35	16.47	24.44	33.60

ภาคผนวก ค

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19

The 19th National Convention on Civil Engineering

เนื่องในโอกาสเฉลิมฉลองครบรอบ 50 ปี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

CIVIL KKU 50 ANNIVERSARY

NCCE 19

วิศวกรรมโยธากับประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน

Civil Engineering and ASEAN Economic Community

14-16 พฤษภาคม 2557
ณ โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออคิด
May 14-16, 2014
Pullman Khon Kaen Raja Orchid Hotel

จัดโดย
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

1	ศ.ดร.ธีรพงศ์	เสนจันทร์ฒิไชย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2	ศ.ดร.เอกสิทธิ์	ลิ้มสุวรรณ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3	รศ.ดร.เกษม	ชูจารุกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4	รศ.ดร.ฐิรวัตร	บุญญะฐี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5	รศ.ดร.ธัญวัฒน์	โพธิศิริ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
6	รศ.ดร.บรรเจิด	พละการ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
7	รศ.ดร.บุญไชย	สถิตมั่นในธรรม	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
8	รศ.ดร.วิสุทธิ์	ช่อวิเชียร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
9	รศ.ดร.ศักดิ์สิทธิ์	เฉลิมพงศ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
10	รศ.ดร.สรวิศ	นฤปิติ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
11	รศ.ดร.สุเชษฐ์	ลิขิตเลอสรวง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
12	รศ.ดร.อัครวัชร	เล่นวารี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
13	รศ.วิชัย	เยี่ยงวีรชน	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
14	ผศ.ดร.จิตติชัย	รุจนกนกานฎ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
15	ผศ.ดร.ฉัตรพันธ์	จินตนาภักดี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
16	ผศ.ดร.ธเนศ	ศรีศิริโรจนากร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
17	ผศ.ดร.นพดล	จอกแก้ว	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
18	ผศ.ดร.มาโนช	โลหเตปานนท์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
19	ผศ.ดร.วัชระ	เพียรสุภาพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
20	ผศ.ดร.ศรีเลิศ	โชติพันธรัตน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
21	อ.ดร.เบญจพร	สุวรรณศิลป์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
22	อ.ดร.อรอนงค์	ลามาปริสุทธิ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
23	ศ.ดร.วิโรจน์	รุโจปการ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
24	รศ.ดร.ก่อโชค	จันทวรางกูร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
25	รศ.ดร.ชวเลข	วณิชเวทิน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
26	รศ.ดร.ดีบุญ	เมธากุลชาตี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
27	รศ.ดร.วัชรินทร์	วิทยกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
28	รศ.ดร.สุธารีน	สถาปิตานนท์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
29	รศ.ดร.สุทธิศักดิ์	ศรสัมพ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
30	รศ.ดร.สุวัฒนา	จิตตลดากร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
31	รศ.ดร.สุวิมล	สัจจวาณิชย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

32	ผศ.ดร.กิจพัฒน์	ภู่รวรรณ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
33	ผศ.ดร.ปิยนุช	เวทย์วิวรณ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
34	ผศ.ดร.วราเมศวร์	วิเชียรแสน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
35	ผศ.ดร.วันชัย	ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
36	ผศ.ดร.วีระเกษตร	สวนผกา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
37	ผศ.ดร.เหมือนมาศ	วิเชียรสินธุ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
38	ผศ.ดร.อดิชัย	พรพรหมินทร์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
39	ผศ.ดร.เอกสิทธิ์	โฆสิตสกุลชัย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
40	ผศ.ทีฆวุฒิ	พุทธภิรมย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
41	อ.ดร.จิระกานต์	ศิริวิชญ์ไมตรี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
42	อ.ดร.จิระวัฒน์	กณะสุต	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
43	อ.ดร.ปนัดดา	กสิกิจวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
44	อ.ดร.พรรณพิมพ์ พุทธรักษา	มะเปี่ยม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
45	อ.ดร.ยุวดี	แซ่ตั้ง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
46	อ.ดร.วิษุวัฒก์	แต้สมบัติ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
47	อ.ดร.สมชาย	ดอนเจดีย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
48	อ.ดร.สโรช	บุญศิริพันธ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
49	อ.ดร.สุภาพร	แก้วกอ เลี่ยวไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
50	อ.ดร.สุริยน	เปรมปราโมทย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
51	อ.ดร.เอกชัย	ศิริกิจพาณิชย์กูล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
52	อ.ฐิตาภรณ์	พ่อบุตรดี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
53	อ.ต่อศักดิ์	ประเสริฐสังข์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
54	อ.ทศพล	จตุระบุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
55	ศ.ดร.ปริญญา	จินดาประเสริฐ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
56	รศ.ดร.เฉลิมชัย	พาวัฒนา	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
57	รศ.ดร.พงศกร	พรรณรัตนศิลป์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
58	รศ.พัชรี	หอวิจิตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
59	รศ.วินัย	ศรีอำพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
60	รศ.วีระ	หอสกุลไท	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
61	ผศ.ดร.กอปร	ศรีนาวิน	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
62	ผศ.ดร.จารึก	ฉีระวงษ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
63	ผศ.ดร.ชาติชาย	ไวยสุระสิงห์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
64	ผศ.ดร.ณรงค์	เหลืองบุตรนาค	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
65	ผศ.ดร.ณัฐพงษ์	อารีมิตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
66	ผศ.ดร.ดลฤดี	หอมดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น

67	ผศ.ดร.ธเนศ	เสถียรนาม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
68	ผศ.ดร.ธันยดา	พรรณเชษฐ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
69	ผศ.ดร.พนกฤษณ	คลังบุญครอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
70	ผศ.ดร.รัตมณี	นันทสาร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
71	ผศ.ดร.ลัดดา	ตันวาณิชกุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
72	ผศ.ดร.วันชัย	สะตะ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
73	ผศ.ดร.วิชุดา	เสถียรนาม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
74	อ.ดร.กิตติเวช	ขันติยวิชัย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
75	อ.ดร.ธนากร	เมธาธรรม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
76	อ.ดร.ธัญลักษณ์	ราษฎร์ภักดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
77	อ.ดร.ปิยะวัชร	ฝอยทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
78	อ.ดร.พัศพันธน์	ชาญวสุนันท์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
79	อ.สุรัตน์	ประมวลศักดิกุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
80	รศ.ชูโชค	อายุพงศ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
81	รศ.ดร.ธนพร	สุปริยศิลป์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
82	ผศ.ดร.พุทธิพล	ดำรงชัย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
83	อ.ดร.เกรียงไกร	อรุโณทยานันท์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
84	อ.ดร.ปรีดา	พิชยาพันธ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
85	อ.ดร.รังสรรค์	อุดมศรี	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
86	อ.ดร.อรรถวิทย์	อุปโยคิน	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
87	ศ.ดร.ชัย	จาตุรพิทักษ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
88	ศ.ดร.ชัยยุทธ	ชินณะราศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
89	รศ.ดร.พรเกษม	จงประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
90	รศ.ดร.วิโรจน์	ศรีสุรภานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
91	ผศ.ดร.ธิดารัตน์	บุญศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
92	ผศ.ดร.พิชญ์	สุธีรวรรธนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
93	ผศ.ดร.วรัช	ก้องกิจกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
94	ผศ.ดร.วิลาสินี	อยู่ชัชวาล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
95	ผศ.ดร.วีรชาติ	ตั้งจิรภัทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
96	ผศ.ดร.วุฒิพงศ์	เมืองน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
97	อ.ดร.ชัยวัฒน์	เอกวัฒน์พานิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
98	อ.ดร.ทรงเกียรติ	ภัทรปัทมาวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
99	อ.ดร.ประพัทธ์	พงษ์เกียรติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
100	รศ.ดร.กิตติชัย	ธนทรัพย์สิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
101	รศ.ดร.ปิติ	สุคนธสุขกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

102	รศ.ดร.พานิช	วุฒิพฤกษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
103	รศ.ดร.วรรณวิทย์	แต้มทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
104	รศ.ดร.สมิตร	ส่งพิริยะกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
105	รศ.ดร.สุพรชัย	อุทัยนฤมล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
106	ผศ.ดร.เทอดศักดิ์	รองวิริยะพานิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
107	อ.ดร.ณัฐพงศ์	มกระธัช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
108	รศ.ดร.สายสุนีย์	พุทธาหุฒเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
109	ผศ.ดร.ปิติศานต์	การ้เมาเตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
110	อ.ดร.จตุพล	ตั้งปกาศิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
111	ผศ.ดร.สำเริง	รักซ้อน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
112	รศ.จรูญ	เจริญเนตรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
113	ผศ.นัฐวุฒิ	ทิพย์โยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
114	อ.ดร.เกียรติสุดา	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
115	อ.ดร.รัฐพล	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
116	รศ.ดร.วชรภูมิ	เบญจโคพาร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
117	รศ.ดร.วัฒนวงศ์	รัตนวราห	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
118	รศ.ดร.สิทธิชัย	แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
119	รศ.ดร.อวิรุทธิ์	ชินกุลกิจนิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
120	ผศ.ดร.ฉัตรชัย	โชติษฐผางกูร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
121	ผศ.ดร.ธีรวัฒน์	สินศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
122	ผศ.ดร.ปรียาพร	โกษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
123	ผศ.ดร.พรพจน์	ตันเส็ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
124	ผศ.ดร.รัฐพล	ภู่บุบผาพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
125	อ.ดร.ศิรดล	ศิริกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
126	รศ.ดร.ชวลิต	ชาลีรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
127	รศ.ดร.นคร	ภู่วโรดม	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
128	รศ.ดร.บุรฉัตร	ฉัตรวีระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
129	รศ.ดร.วีรยา	อิมอ้อย	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
130	รศ.ดร.สายันต์	ศิริมนตรี	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
131	ผศ.ดร.กฤดายุทธ์	ชมภูนิ่ง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
132	ผศ.ดร.ภาวิณี	เอี่ยมตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
133	ผศ.ดร.สสิกรณ์	เหลืองวิชชเจริญ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
134	อ.ดร.ดุษฎี	สถิรเศรษฐทวี	มหาวิทยาลัยนเรศวร
135	ผศ.ดร.ทวีชัย	สำราญวานิช	มหาวิทยาลัยบูรพา
136	ผศ.ดร.ธรรมนูญ	รัศมีมาสเมือง	มหาวิทยาลัยบูรพา

137	ผศ.ดร.วิเชียร	ชาลี	มหาวิทยาลัยบูรพา
138	ผศ.ดร.สยาม	ยิ้มศิริ	มหาวิทยาลัยบูรพา
139	ผศ.ดร.สุรเมศวร์	พิริยะวัฒน์	มหาวิทยาลัยบูรพา
140	อ.ดร.ฐิติมา	วงศ์อินตา	มหาวิทยาลัยบูรพา
141	อ.ดร.ปิติ	โรจน์วรรณสันธุ์	มหาวิทยาลัยบูรพา
142	อ.ดร.พัทรพงษ์	อาสนจินดา	มหาวิทยาลัยบูรพา
143	อ.ดร.เพชร์รัตน์	ลิ้มสุปรียารัตน์	มหาวิทยาลัยบูรพา
144	อ.เรือเอก ดร.สราวุธ	ลักษณะโต	มหาวิทยาลัยบูรพา
145	ผศ.ดร.ณัฐพงศ์	ดำรงวิริยะนุภาพ	มหาวิทยาลัยพะเยา
146	ผศ.ดร.ธนกร	ชมภูรัตน์	มหาวิทยาลัยพะเยา
147	ผศ.ดร.สมบูรณ์	เชี่ยงฉิน	มหาวิทยาลัยพะเยา
148	ผศ.ดร.กริสน์	ชัยมูล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
149	ผศ.ดร.เรืองรุชดิ์	ชีระโรจน์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
150	ผศ.ดร.สหลาภ	หอมวุฒิวงศ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
151	ผศ.ดร.ธัชวีร์	ลีละวัฒน์	มหาวิทยาลัยมหิดล
152	ผศ.ดร.สมชาย	ปฐมศิริ	มหาวิทยาลัยมหิดล
153	อ.ดร.ชลลดา	เลาะฟอ	มหาวิทยาลัยมหิดล
154	ผศ.ดร.วรรณี	ศุขสาตร	มหาวิทยาลัยรังสิต
155	ผศ.สมศักดิ์	เอื้ออัชฌาสัย	มหาวิทยาลัยรังสิต
156	อ.ดร.กรกนก	บุญเสริม	มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
157	อ.ดร.สกลวรรณ	ห่านจีตสุวรรณ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
158	ผศ.ดร.วสันต์	ธีระเจตกูล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
159	ศ.ดร.พิชัย	ธานีรณานนท์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
160	ผศ.ดร.ธนันท์	ชุปอุปการ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
161	ผศ.ดร.ภาสกร	ชัยวิริยะวงศ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
162	อ.ดร.ปรเมศวร์	เหลือเทพ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
163	อ.ดร.วิชัยรัตน์	แก้วเจือ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
164	อ.ดร.ฐกลพัศ	เจนจิวัฒนกุล	มหาวิทยาลัยสยาม
165	รศ.ดร.สถาพร	โกศา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
166	ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์	แก้วกุลชัย	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
167	ผศ.ดร.สิทธา	เจนศิริศักดิ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
168	อ.ดร.ณนัดกิจ	ชารีรัตน์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
169	พ.อ.ผศ.ดร.ไท	ชาญกล	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
170	อ.ดร.ภัควัฒน์	แสนเจริญ	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
171	อ.ดร.รักติพงษ์	สหมิตรมงคล	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร

172	อ.ดร.วรางคณา	แสงสร้อย	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
173	รศ.ดร.จักรพงษ์	พงษ์เพ็ง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
174	รศ.ดร.เอกชัย	สุมาลี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
175	รศ.แหลมทอง	เหล่าคงถาวร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
176	ผศ.ดร.อุมา	สีบุญเรือง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
177	อ.ดร.จำรัส	พิทักษ์ศยุงคาร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
178	ดร.สุเมธ	องกิตติกุล	สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย

หมายเหตุ: เรียงลำดับตามชื่อสถาบันการศึกษา หน่วยงานราชการ และหน่วยงานเอกชน (ก-ฮ)

Technical Session 5: Fiber and Applications

Room: ERAWAN 1

Chairperson: Prof. Somnuk Tangtermsirikul, Dr. Rattapon Somna

Time	Paper ID	Title	Page No
10:30 - 11:00	Invited 1	Fibre Reinforced Bulletproof Concrete Panel with Cushion Layer Made of Rubberized Concrete	86
11:00 - 11:15	88	An Improvement of Mechanical Properties of Oil Palm Wood by Squeeze Method and Using Bioresin	149
11:15 - 11:30	137	Flexural Toughness Enhancement of Hooked-End SFRC	149
11:30 - 11:45	449	Experimental Study on Durability Properties of Fiber Reinforced Concrete	150
11:45 - 12:00	589	Development of Physic – Nut Composite Plastic Material for Construction Industry	150

Technical Session 6: Concrete Durability II

Room: ERAWAN 1

Chairperson: Assoc. Prof. Prasert Suwanvitaya, Asst. Prof. Sahalap Homvutivong

Time	Paper ID	Title	Page No
13:00 - 13:30	Invited 2	Analytical Simulation of Thermal Cracking in Mass Concrete	87
13:30 - 13:45	133	Performance of Corrosion Inhibitors to Prevent Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete due to Chloride	151
13:45 - 14:00	161	Chloride Penetration, Corrosion of Reinforcing Steel and Compressive Strength of Concrete Containing Fly Ash and Concrete with Slag Cement after 4-Year Exposure in Marine Environment	151
14:00 - 14:15	179	Time to Initial Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete Containing Rice Husk-Bark Ash under Marine Environment	152
14:15 - 14:30	188	Effect of Concentration of Sulfate Solution on Expansion and Weight Loss of Mortar	152
14:30 - 14:45	516	A Study of Compressive Strength and Chloride Resistance of Concretes Cured in Water and Air	153
14:45 - 15:00	517	Effect of Various Pozzolanic Materials on Alkali-Silica Reaction	153

Effect of Concentration of Sulfate Solution on Expansion and Weight Loss of Mortar

Preeda Phanphong[1], Pitisan Krammart[2]

[1,2] Rajamangala University of Technology Thanyaburi

E-mail: [1]*rps13_tte@yahoo.com*, [2]*pitisan_k@rmutt.ac.th*

ABSTRACT

The effect of concentration of sulfate solution on expansion and weight loss of mortar with fly ash and limestone powder. The concentration of sulfate solution of 1% 5% 10% 15% and 20% (by weight) were used. The expansion of mortar in sodium sulfate solution and the weight loss of mortar in magnesium sulfate solution were considered. The results indicated that the expansion of mortar with fly ash and limestone powder in sodium sulfate solution was lower than that of portland cement mortar. Except the mortar with high CaO fly ash (19.19%) replacing in quantity less than 10%, the expansion will be greater than portland cement mortar. In magnesium sulfate solution, it was found that the weight loss of mortar with fly ash was more than that of portland cement mortar. While the weight loss of mortar with limestone powder or with fly ash incorporating with limestone power was similar to that of portland cement mortar. Moreover it is found that the 10% concentration of sulfate can be used to evaluate sodium sulfate solution resistance by measuring expansion value if the mortar samole has high proportion of water to cementitious material. If concrete sample has low proportion of water to cementitious material higher concentration of sulfate solution (15% and 20%) can be used. For evaluation of magnesium sulfate solution resistance by measuring weight loss, it is found that high concentration of sulfate solution (20%) can be used to evaluate sulfate resistance.

Keywords: Sulfate Solution Concentration, Fly Ash, Limestone Powder, Expansion, Weight Loss

ผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์

Effect of Concentration of Sulfate Solution on Expansion and Weight Loss of Mortar

*ปรีดา พันธุ์พงศ์[1], ปิติศานต์ กร้ำมาตร[2]

[1]นักศึกษาปริญญาโท, [2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: [1]p_phanphong@gmail.com, [2] pitisan.k@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ (ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน) ในสารละลายซัลเฟตที่มีความเข้มข้นต่างกัน (ร้อยละ1, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก) โดยวัดการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และวัดการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ผลการศึกษาพบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ยกเว้นเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO สูง (ร้อยละ 19.19) ในปริมาณที่น้อย (ร้อยละ 10) จะให้ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ส่วนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมหินปูนหรือผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนจะให้ค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และพบว่าในการประเมินการต้านทานสารละลายโซเดียมซัลเฟต ถ้าใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง โดยวัดค่าการขยายตัวนั้นสามารถใช้ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตร้อยละ 10 ได้ แต่ถ้าตัวอย่างคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำสามารถใช้ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตที่สูงได้ (ร้อยละ 15 และ 20) ส่วนการประเมินการต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตโดยวิธีวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักนั้นพบว่าในความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตที่สูง (ร้อยละ 20) ยังสามารถใช้ประเมินการต้านทานซัลเฟตได้

คำสำคัญ: ความเข้มข้นสารละลายซัลเฟต, เถ้าลอย, ผงหินปูน, การขยายตัว, การสูญเสียน้ำหนัก

Abstract

The aim of this research were studied the effect of concentration of sulfate solution on expansion and weight loss of mortar with fly ash and limestone powder. The concentration of sulfate solution of 1% 5% 10% 15% and 20% (by weight) were used. The expansion of mortar in sodium sulfate solution and the weight loss of mortar in magnesium sulfate solution were considered. The results indicated that the expansion of mortar with fly ash and limestone powder in sodium sulfate solution was lower than that of portland cement mortar. Except the mortar with high CaO fly ash (19.19%) replacing in quantity less than 10%, the expansion will be greater than portland cement mortar. In magnesium sulfate solution, it was found that the weight loss of mortar with fly ash was more than that of portland cement mortar.While the weight loss of mortar with limestone powder or with fly ash incorporating with limestone power was similar to that of portland cement mortar. Moreover it is found that the 10%concentration of sulfate can be used to evaluate sodium sulfate solution resistance by measuring expansion value if the mortar sample has high proportion of water to cementitious material. If concrete sample has low proportion of water to cementitious material higher concentration of sulfate solution (15% and 20%)can be used. For evaluation of magnesium sulfate solution resistance by measuring weight loss, it is found that high concentration of sulfate solution (20%) can be used to evaluate sulfate resistance.

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

* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)

E-mailaddress: p_phanphong@gmail.com

1. คำนำ

ในปัจจุบันปัญหาความคงทนของโครงสร้างได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไปจากการเติบโตของเมือง และการใช้อาคารในสภาพแวดล้อมรุนแรง การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องและพฤติกรรมการเสื่อมสภาพ ตลอดจนแนวทางป้องกันสำหรับโครงสร้างใหม่ และการแก้ไขอาคารเก่าเมื่อเกิดการเสื่อมสภาพ รวมถึงการหาวัสดุซ่อมแซมที่มีคุณภาพดี ซึ่งเป็นความพยายามเพื่อยืดอายุการใช้งานอาคารที่มีอยู่แล้วจึงเป็นแนวทางงานวิจัยที่มีความจำเป็นในปัจจุบันโครงสร้างคอนกรีตทั่วไปที่ต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีสารซัลเฟต เนื่องจากซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติ ทั้งในดินและในน้ำทะเล อำนาจการทำลายของซัลเฟตต่อคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟตและความชื้น การทำลายของซัลเฟตจะรุนแรงยิ่งขึ้นเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกและแห้งสลับกัน [1] ซึ่งสภาพแวดล้อมเช่นนี้จะทำให้คอนกรีต มีอายุการใช้งานสั้นลง

รายงานการศึกษาทั้งในและต่างประเทศมากมายที่ระบุถึงประโยชน์และข้อดีของการใช้สารปอซโซลานร่วมกับซีเมนต์หลายประการนอกเหนือไปจากราคาที่ต่ำกว่าซีเมนต์ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบทางงบประมาณ สารปอซโซลานที่รู้จักกันแพร่หลาย ได้แก่ เถ้าลอย ซิลิก้าฟูม และตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นต้น ในปัจจุบันมีการใช้เถ้าลอยจากแหล่งในประเทศในงานคอนกรีตมากขึ้นผลโดยรวมจากการใส่เถ้าลอยลิกไนต์ คือ ช่วยลดปริมาณ C_3A สารต้นเหตุในปูนซีเมนต์ ที่จะทำให้เกิดการขยายตัวของเพสต์ (paste) ลงได้ และช่วยลดปริมาณสารละลาย $Ca(OH)_2$ อิสระในโพรงคอนกรีตให้เหลือน้อยลง ทำให้เกิดโครงสร้างเชื่อมประสานมากขึ้น คอนกรีตที่ได้จะมีโพรงน้อยลงมีเนื้อแน่นขึ้น และมีความทึบน้ำเพิ่มขึ้นดังนั้น คอนกรีตชนิดนี้จึงสามารถต้านทานการแทรกซึมของสารละลายต่างๆ ที่จะเข้าไปทำลายเนื้อคอนกรีตได้มากขึ้น และส่งผลให้คอนกรีตมีความคงทนต่อการกร่อนทำลายของซัลเฟตสูงขึ้นด้วย [2, 3, 4]

นอกจากนี้ปัจจุบันยังมีการนำผงหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) มาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผงหินปูนเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มกำลังรับแรงในระยะต้นและความคงทนบางชนิดให้แก่คอนกรีตได้ จากข้อดีของผงหินปูนดังกล่าวทำให้มีแนวโน้มที่จะถูกนำมาใช้ในปริมาณมากขึ้น [4, 5, 6]

ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบจากความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตในระยะยาวที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการต้านทานซัลเฟตโดยเปรียบเทียบผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตที่ต่างกัน

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก นอกจากนี้ได้ใช้เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และใช้ผงหินปูนที่มีขนาด 2 ไมโครเมตร เป็นวัสดุประสานเพิ่มแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์โดยคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 1 ส่วนทรายใช้ทรายน้ำจืดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

คุณสมบัติทางเคมี	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5	เถ้าลอยแม่เมาะ	ผงหินปูน (2μ)
SiO_2	19.87	21.87	39.4	0.46
Al_2O_3	4.87	3.87	17.93	0.06
Fe_2O_3	3.55	4.34	12.92	0.03
CaO	65.03	64.56	19.19	55.25
MgO	2.52	1.11	2.99	0.37
SO_3	0.73	2.08	3.03	<0.01
Na_2O	0.02	<0.01	1.36	<0.01
K_2O	0.45	0.24	2.50	0.01
TiO_2	0.26	0.21	0.34	<0.01
P_2O_5	0.07	0.05	0.20	0.01
LOI	2.26	1.59	0.17	43.79
ความละเอียดโดยวิธีของ Blaine (cm^2/g)	3,480	3,340	2,836	12,160
ความถ่วงจำเพาะ	3.10	3.18	2.29	2.79

2.2 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์

สำหรับสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษาความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ในครั้งนี้มีทั้งหมด 14 สัดส่วนผสม โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40 และ 0.55 และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) เท่ากับ 2.75 ซึ่งรายละเอียดของสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5	เถ้าลอย	ผงหินปูน	ทราย	น้ำ
1.	C1W40	1.00	-	0	0	2.75	0.40
2.	C5W40	-	1.00	0	0	2.75	0.40
3.	C1W40FA20	0.80	-	0.20	0	2.75	0.40
4.	C1W40FA40	0.60	-	0.40	0	2.75	0.40
5.	C1W40LP10	0.90	-	0	0.10	2.75	0.40
6.	C1W40FA10LP10	0.80	-	0.10	0.10	2.75	0.40
7.	C1W40FA30LP10	0.60	-	0.30	0.10	2.75	0.40
8.	C1W55	1.00	-	-	-	2.75	0.55
9.	C5W55	-	1.00	0	-	2.75	0.55
10.	C1W55FA20	0.80	-	0.20	-	2.75	0.55
11.	C1W55FA40	0.60	-	0.40	-	2.75	0.55
12.	C1W55LP10	0.90	-	0	0.10	2.75	0.55
13.	C1W55FA10LP10	0.80	-	0.10	0.10	2.75	0.55
14.	C1W55FA30LP10	0.60	-	0.30	0.10	2.75	0.55

หมายเหตุ:
- C1 หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- C5 หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5
- FA หมายถึง เถ้าลอย
- LP หมายถึง ผงหินปูนขนาด 2 ไมโครเมตร
- W หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
- ตัวเลข 10, 20, 30, 40, 50 และ 55 หมายถึง ร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยหรือผงหินปูนและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

2.3 สารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการศึกษา

สารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นของสารละลายร้อยละ 5,10,15 และ20 โดยน้ำหนัก หรือปริมาณอิออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33800,67600,101400 และ135200 ppm ตามลำดับ สำหรับการเตรียมสารละลายซัลเฟตเช่นกรณีของความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนักนั้นใช้สารโซเดียมซัลเฟต 50 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร จะได้ปริมาณอิออนซัลเฟตเท่ากับ 33800 ppm และใช้สารแมกนีเซียมซัลเฟต 42.36 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ได้ปริมาณอิออนซัลเฟตที่เท่ากันคือ 33800 ppm โดยแยกเตรียมสารละลายแต่ละชนิดไว้ล่วงหน้า 1 วัน อุณหภูมิสารละลายขณะแช่ตัวอย่างประมาณ 30±2°Cในการแช่ตัวอย่างใช้อัตราส่วนปริมาตรสารละลายต่อปริมาตรตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ประมาณ 4 ต่อ 1 และจัดให้มีระบบการหมุนเวียนสารละลายในถังโดยสารละลายซัลเฟตที่ใช้แช่ตัวอย่างจะมีทำการเปลี่ยนทุกๆ อายุแช่ตัวอย่าง 2 เดือน

2.4 การเตรียมตัวอย่างมอร์ต้าร์

การศึกษาครั้งนี้ใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 25×25×285 มม. เพื่อวัดค่าการขยายตัว และใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด50×50×50 มม. เพื่อวัดค่าการสูญเสียน้ำหนัก ทำการหล่อตัวอย่างในแบบหล่อแล้วบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง ถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง หลังจากถอดแบบนำตัวอย่างไปแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว(saturated lime water) เป็นเวลา 28 วัน

2.5 การทดสอบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์

2.5.1 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์

สำหรับการประเมินการต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์โดยวัดการขยายตัว (expansion) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ (ขนาด 25×25×285 มม.) นั้น ใช้ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ทั้งนี้เพราะกลไกการทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะส่งผลให้คอนกรีตเกิดการขยายตัว [1] โดยหลังจากนำตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำปูนขาวอิ่มตัวครบ 28 วัน แล้วนำตัวอย่างไปวัดความยาวเริ่มต้นเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่ด้วยเครื่องวัดความยาว (length comparator) จากนั้นจึงนำตัวอย่างมอร์ต้าร์ไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่ออายุของตัวอย่างได้ 2, 4, 8, 15 สัปดาห์ และทุกๆ 2 เดือน ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวตามมาตรฐาน ASTM C1012 เพื่อหาร้อยละของการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์จากการเฉลี่ย 4 ตัวอย่าง

2.5.2 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์

ในการวัดการสูญเสียน้ำหนัก (weight loss) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ (ขนาด 50×50×50 มม.) นั้นใช้ในการประเมินการต้านทานในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตทั้งนี้เพราะกลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะส่งผลให้ตัวอย่างสูญเสียเนื้อตัวอย่าง [1] โดยหลังจากแช่ตัวอย่างมอร์ต้าร์ในน้ำปูนขาวอิ่มตัวครบ 28 วัน แล้วนำตัวอย่างล้างทำความสะอาดเอาปูนขาวและสิ่งสกปรกที่อาจติดอยู่ที่ผิวออกหลังจากนั้นเช็ดด้วยผ้าให้ผิวแห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเริ่มต้นเริ่มต้นหลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ได้เตรียมไว้ โดยที่ระยะเวลาการแช่ในสารละลายเมื่ออายุได้ครบ 2, 4, 8, 15 สัปดาห์และทุกๆ 2 เดือน นำตัวอย่างมอร์ต้าร์มาปัดผิวด้วยแปรงเพื่อให้เศษมอร์ต้าร์ที่เสื่อมสภาพหลุดออกและซับผิวให้แห้งด้วยผ้า แล้วนำตัวอย่างมอร์ต้าร์ไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ โดยเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่าง

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์

ผลการประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยวัดค่าการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูนมีรายละเอียดผลการทดสอบและวิเคราะห์ดังนี้

3.1 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

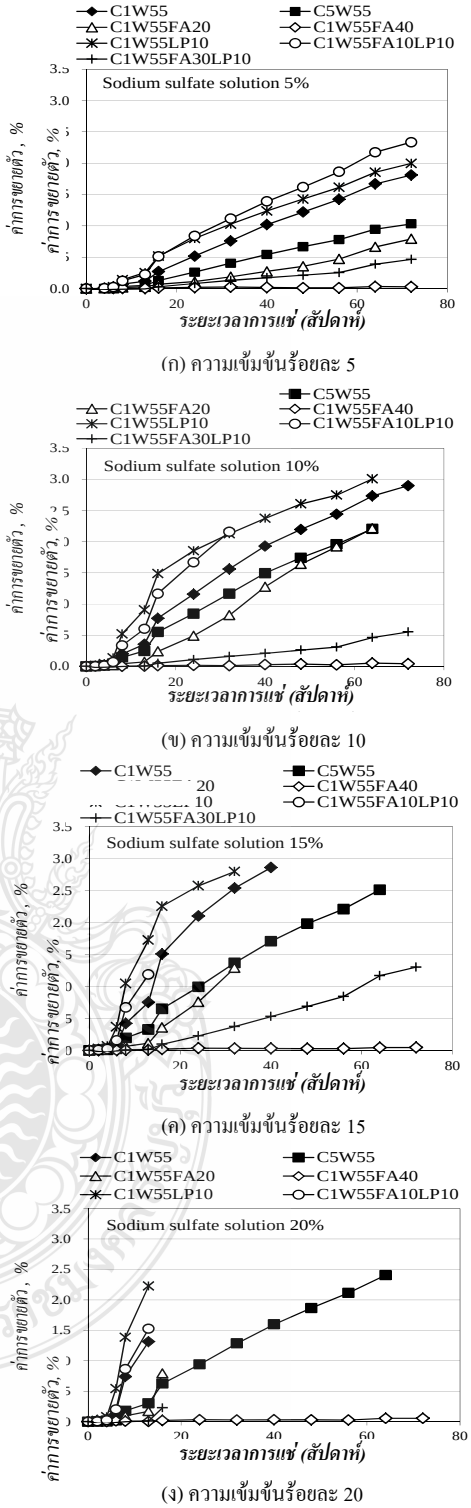
รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการขยายตัวและระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 พบว่าทุกความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ศึกษาในครั้งนี้ การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนทั้งนี้เพราะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีปริมาณ C_3A น้อยกว่า ส่งผลให้เกิดเอททริงไจท์ (ettringite) น้อยกว่า จึงทำให้การขยายตัวน้อยกว่าและพบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์แทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทั้งร้อยละ20 และ 40 นั้น มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนโดยเฉพาะเมื่อแทนที่ด้วยร้อยละ40 มีค่าค่อนข้างน้อย (ของทุกความเข้มข้นสารละลายโซเดียมซัลเฟต) ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเป็นการลดปริมาณ C_3A รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานนั้นเป็นการลดปริมาณของ $Ca(OH)_2$ จึงส่งผลให้การขยายตัวน้อยกว่า ส่วนกรณีเมื่อแทนที่ผงหินปูนร้อยละ10ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นั้น กลับพบว่าค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผงหินปูนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนของทุกความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตเช่นกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ผงหินปูนเป็นการเติมเต็มในเพสต์ส่งผลให้มีความแน่นเพิ่มขึ้นในเพสต์ดังนั้นทำให้มีช่องว่างไม่เพียงพอในการขยายตัวของเอททริงไจท์จึงทำให้เกิดการขยายตัวมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน สุดท้ายกรณีมอร์ต้าร์ 3 วัสดุประสานคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน พบว่าเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ10 นั้น (ทุกความเข้มข้นสารละลายโซเดียมซัลเฟต) การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ทั้งนี้เพราะเหตุผลดังที่กล่าวแล้ว กล่าวคือปฏิกิริยาปอซโซลานและการลดปริมาณปูนซีเมนต์ส่งผลให้เกิดเอททริงไจท์น้อยลง แต่เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ10ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ10นั้น กลับพบว่าการขยายตัว

ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ให้ค่าที่ค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยที่ใช้มีปริมาณ CaO ค่อนข้างสูงคือร้อยละ 19.19 ดังนั้นเมื่อแทนที่ในปริมาณที่น้อย (ร้อยละ 10) ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดน้อยในขณะที่ CaO สูงจะเป็นการเพิ่ม $Ca(OH)_2$ จึงทำให้เกิดเอททริงไจท์มาก ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของปิติสานต์และคณะ [2] รวมทั้งตัวอย่างมีความแน่นเนื่องจากการเติมเต็มของผงหินปูนจึงทำให้มีช่องว่างน้อยให้เอททริงไจท์ส่งผลให้การขยายตัวของมอร์ต้าร์มีค่าค่อนข้างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ต่างความเข้มข้นกัน พบว่าแนวโน้มการขยายตัวทุกความเข้มข้นไปในทิศทางเดียวกัน และพบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มาก (0.55) เมื่อความเข้มข้นสูงมาก คือร้อยละ 15 และ 20 นั้น ที่อายุการแช่ในสารละลายซัลเฟตยังไม่มากตัวอย่างจะเกิดการเสียหาย (ไม่สามารถวัดการขยายตัวได้) โดยเฉพาะ ที่ความเข้มข้นสารละลายซัลเฟต ร้อยละ 20 จึงทำให้ไม่สามารถที่จะประเมินความต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างได้ (เนื่องจากตัวอย่างเกิดความเสียหาย) จึงไม่น่าจะประเมินความต้านทานซัลเฟตได้ชัดเจน ส่วนที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 นั้น ผลยังให้ค่าในทิศทางที่ชัดเจนในการเปรียบเทียบ แสดงว่าในการประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยวัดการขยายตัวนั้น เมื่อใช้ความเข้มข้นร้อยละ 15 และ 20 ไม่น่าจะใช้ได้ แต่ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 น่าจะใช้ได้ ซึ่งจะช่วยร่นระยะเวลาในการทดสอบเมื่อเทียบกับความเข้มข้น ร้อยละ 5 (ตามมาตรฐานASTM)

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการขยายตัวและระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 พบว่าจะให้ผลแนวโน้มในทิศทางเดียวกับกรณีของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 แต่การขยายตัวจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ทั้งนี้เพราะปริมาณน้ำที่น้อยจะช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับตัวอย่างมอร์ต้าร์ ส่งผลให้สารละลายซัลเฟตเข้าสู่ตัวอย่างได้ยาก และพบว่าในกรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 นั้น การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ไม่ค่อยแตกต่างกันมากนักในทุกกรณี เป็นเพราะการขยายตัวของตัวอย่างเกิดน้อยนั่นเอง

อย่างไรก็ตาม จะสังเกตว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 นั้น การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตทุกความเข้มข้น โดยเฉพาะความเข้มข้นร้อยละ 20 แม้อายุการแช่ของตัวอย่างจะเท่ากันแต่ตัวอย่างยังไม่มีการเสียหาย (สามารถประเมินได้) แสดงว่าถ้าใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อย ในการประเมินการต้านทานซัลเฟต โดยวัดการขยายตัวนั้น ในความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตที่มาก (ร้อยละ 20) ยังคงใช้ได้ ซึ่งจะทำให้ช่วยร่นระยะเวลาในการประเมินความต้านทานซัลเฟตได้



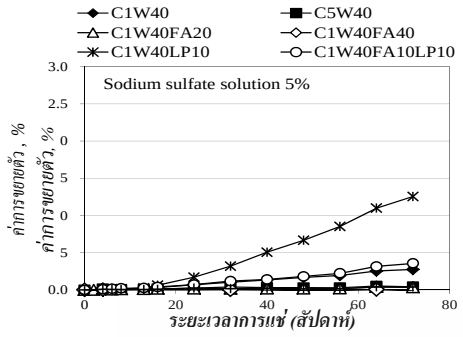
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 5

(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 10

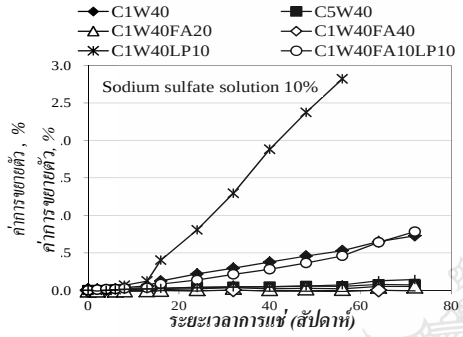
(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 15

(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 20

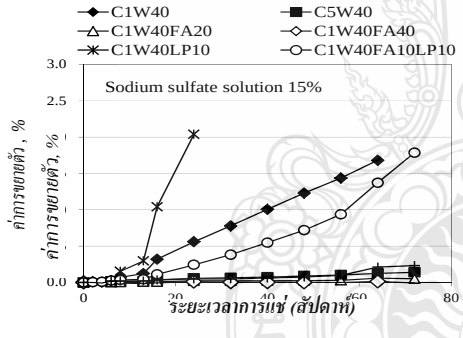
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์และระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55



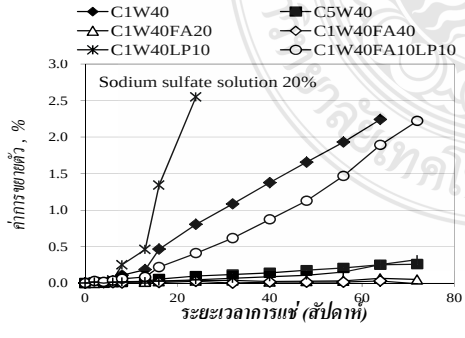
(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 5



(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 10



(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 15



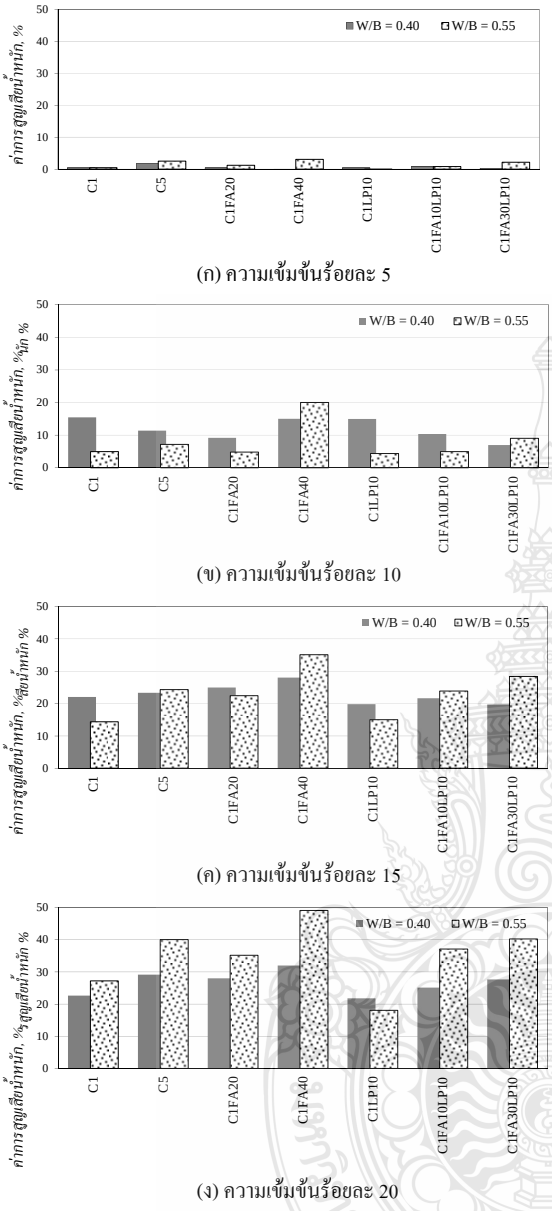
(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 20

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์และระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

3.2 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

จากรูปที่ 3 แสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 โดยแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ระยะเวลาการแช่ 80 สัปดาห์ พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีแนวโน้มมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อความเข้มข้นสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีมาก (ร้อยละ 15 และ 20) จะเห็นชัดเจนขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าความพรุนมากกว่า [3] จึงทำให้สารละลายซัลเฟตเข้าได้มากกว่า ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์แทนที่เถ้าลอยมีแนวโน้ม ให้ค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตมากขึ้น (ร้อยละ 15 และ 20) ทั้งนี้เพราะค่าการเป็นด่างในคอนกรีตลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน จึงทำให้ไม่มีเสถียรภาพเปลี่ยน CSH เป็น MSH ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน จึงทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้น [1] ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์แทนที่ผงหินปูน (ร้อยละ 10) มีแนวโน้มน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ทั้งนี้เพราะผงหินปูนเป็นวัสดุเติมเต็มจึงเพิ่มความแน่นให้กับเพสต์มีผลให้สารละลายซัลเฟตเข้าทำลายได้ยาก สุดท้ายพบว่ามอร์ต้าร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีแนวโน้มว่าการสูญเสียน้ำหนักใกล้เคียงหรือมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่สูง ทั้งนี้ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวแล้ว

อย่างไรก็ตาม พบว่าในกรณีที่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีความเข้มข้นน้อยมีแนวโน้มว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อยกว่า (0.40) จะให้ค่าที่มากกว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากกว่า (0.55) แต่เมื่อความเข้มข้นสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตสูงขึ้น (ร้อยละ 20) พบว่าจะให้ผลกลับกัน กล่าวคือการสูญเสียของน้ำหนักตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสานที่มาก จะให้ค่ามากกว่าเมื่อใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อยกว่ายกเว้นในกรณีตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีแนวโน้มมีความพรุนมาก (แทนที่ด้วยเถ้าลอยอย่างเดียว) ยังคงให้ผลในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือไม่ว่าความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตมากหรือน้อย ก็จะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากเมื่อใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงกว่า จากผลดังกล่าว เหตุผลอาจเป็นเพราะเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่น้อยสามารถทำลายตัวอย่างซึ่งมีความทึบน้ำมาก (W/B 0.40) นั้น กลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นการทำลายที่เนื้อของคอนกรีตจากภายนอก จึงทำความรุนแรงอยู่ที่ผิวตัวอย่าง ในทำนองกลับกัน ถ้าตัวอย่างมีความพรุนมาก (W/B 0.55) นั้น เมื่อความเข้มข้นสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตสูง สามารถเข้าทำลายได้มาก จึงทำให้การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์มากกว่า



(ก) ความเข้มข้นร้อยละ 5

(ข) ความเข้มข้นร้อยละ 10

(ค) ความเข้มข้นร้อยละ 15

(ง) ความเข้มข้นร้อยละ 20

รูปที่ 3 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ที่ระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 80 สัปดาห์

3.3 ผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์

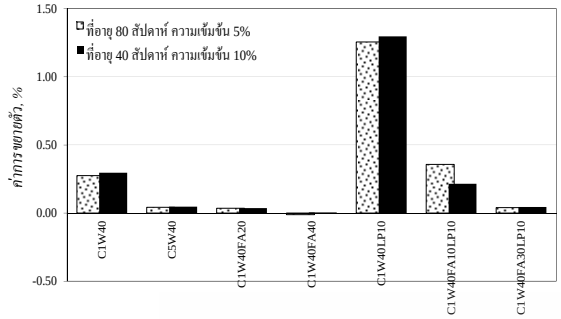
3.3.1 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

จากที่กล่าวมาแล้วในกรณีผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อการขยายตัวในกรณีใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง (0.55) นั้น เมื่อความเข้มข้นที่สูงขึ้น (ในที่นี้ร้อยละ 15 และ 20) ไม่สามารถประเมินความต้นทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ได้ชัดเจน(รูปที่ 1 (ค) และ (ง)) ทั้งนี้เพราะตัวอย่างมอร์ต้าร์เกิดความเสียหายแม้ว่าที่อายุของเวลาแช่ (13 สัปดาห์)ไม่มากก็ตาม ซึ่งไม่สามารถวัดการขยายตัวอย่างมอร์ต้าร์ได้ แต่พบว่าเมื่อความเข้มข้นสารละลายโซเดียมซัลเฟตร้อยละ 5 และร้อยละ 10 เมื่ออายุของการแช่ 80 สัปดาห์แล้ว ยังสามารถวัดการขยายตัวได้ โดยได้ผลในทิศทางเดียวกันของตัวอย่างทุกสัดส่วนการผสมของมอร์ต้าร์และพบว่าเมื่อพิจารณาปริมาณการขยายตัวของตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อายุ 80 สัปดาห์ ที่มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 10 เมื่ออายุ 40 สัปดาห์ของการแช่ในสารละลายซัลเฟต แสดงว่าถ้าใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตร้อยละ 10 สามารถร่นระยะเวลาการแช่ได้ 40 สัปดาห์ เมื่อเปรียบเทียบตามมาตรฐาน ASTMC1012 ซึ่งใช้สารละลายเข้มข้นโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 (ดังตารางที่ 3 และรูปที่ 4)

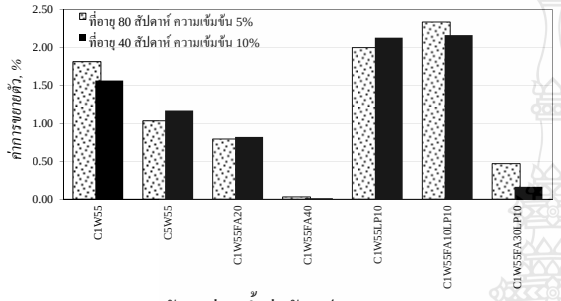
อย่างไรก็ตามในกรณีที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ (0.40) ในการประเมินการต้านทานสารละลายโซเดียมซัลเฟต เมื่อใช้ความเข้มข้นที่สูง (ร้อยละ 15 และ 20) ก็ยังสามารถใช้ประเมินได้

ตารางที่ 3 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 ที่อายุการแช่ 80 และ 40 สัปดาห์

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่อายุการแช่ 80 สัปดาห์ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 5%	ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่อายุการแช่ 40 สัปดาห์ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 10%
C1W40	0.27	0.30
C5W40	0.04	0.05
C1W40FA20	0.04	0.04
C1W40FA40	- 0.01	0.00
C1W40LP10	1.25	1.30
C1W40FA10LP10	0.36	0.21
C1W40FA30LP10	0.04	0.04
C1W55	1.81	1.56
C5W55	1.03	1.17
C1W55FA20	0.79	0.82
C1W55FA40	0.03	0.01
C1W55LP10	2.00	2.13
C1W55FA10LP10	2.33	2.16
C1W55FA30LP10	0.47	0.16



(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

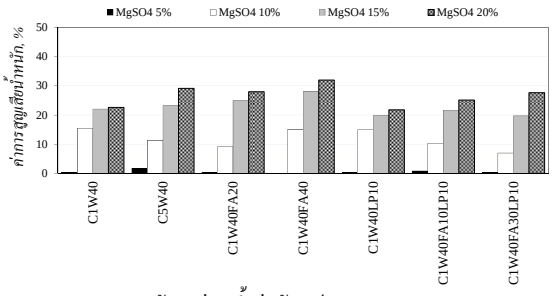


(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

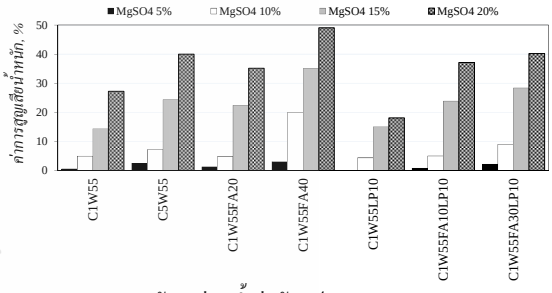
รูปที่ 4 เปรียบเทียบระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อายุ 80 สัปดาห์ และความเข้มข้นร้อยละ 10 ที่อายุ 40 สัปดาห์

3.3.2 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ในกรณีการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 แม้ว่าอายุตัวอย่าง 80 สัปดาห์แล้วก็ตาม ทุกความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตยังสามารถประเมินความต้านซัลเฟตได้ชัดเจน (โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นร้อยละ 20) กล่าวคือทุกความเข้มข้นการสูญเสียที่น้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ทุกสัดส่วนไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่ามากขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่สูงขึ้น นั่นหมายความว่าในการประเมินความต้านทานซัลเฟตกรณีสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตโดยวัดการสูญเสียน้ำหนักนั้น เมื่อใช้ความเข้มข้นร้อยละ 20 สามารถใช้ได้ ซึ่งจะเป็นการช่วยร่นเวลาในการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบตามมาตรฐาน ASTM C1012 ที่ใช้ความเข้มข้นเพียงร้อยละ 5 แสดงดังรูปที่ 5



(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

รูปที่ 5 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 ที่ระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 เป็นเวลา 80 สัปดาห์

4. สรุป

1. ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน ให้ค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ยกเว้นเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนอย่างเดียว และเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่น้อยร่วมกับผงหินปูนที่ให้ค่าการขยายตัวมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

2. ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยให้ค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ส่วนมอร์ต้าร์แทนที่ผงหินปูน และแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนให้ค่าน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตน้อยจะทำลายตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีความทึบน้ำสูง (W/B 0.40หรือมอร์ต้าร์แทนที่ผงหินปูน) ได้มากกว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีความทึบน้ำต่ำ (W/B 0.55 หรือมอร์ต้าร์แทนที่เถ้าลอย) แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตที่สูง (ในที่นี้ร้อยละ15 และ 20) จะทำลายตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีความทึบน้ำต่ำได้มากกว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ทึบน้ำสูง

3. ในการประเมินการต้านทานสารละลายโซเดียมซัลเฟตโดยวิธีวัดค่าการขยายตัวนั้น พบว่าถ้าตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง (0.55) สามารถใช้ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตร้อยละ 10 ประเมินได้เช่นเดียวกับที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 แต่ถ้าในกรณีตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ (0.40) ซึ่งมีค่าการขยายตัวน้อย สามารถใช้ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตได้สูงขึ้น (ร้อยละ 15 และ 20)

4. ในการประเมินการต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตโดยวิธีวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักนั้น พบว่าในทุกความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต (ร้อยละ 10, 15 และ 20) ยังสามารถใช้ประเมินการต้านทานซัลเฟตได้เช่นเดียวกับที่ความเข้มข้นสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 5

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] สมนึก ตั้งเติมสิริกุล. 2543, "ความคงทนของคอนกรีต" กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.

[2] ชัยจาตุรพิทักษ์กุลและวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, "ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต" พิมพ์ครั้งที่ 2, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2552.

[3] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, "ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต" กรุงเทพฯ, สมาคมคอนกรีตไทย, 2547.

[4] ผศ. ดร. ปิติศานต์ กร้ำมาตร, "คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน" ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553.

[5] จตุพร ชูตาภา และวรพจน์ แสงราม, "แคลเซี่ยมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate : $CaCO_3$)", วิหารแดง, ปีที่ 1, ฉบับที่ 6 มิถุนายน 2552, หน้า 5.

[6] นพคุณ ผลโพธิ์, "ผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์", ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.

[7] ปิติศานต์ กร้ำมาตร และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล, "การต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูน", การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3, 24-26 ตุลาคม 2550, ชลบุรี, 2550.

[8] Pitisan Krammart, "Properties of cement made by partially replacing cement raw materials with municipal solid waste ash and calcium carbide waste, and sulfate resistance of flyash concrete", Ph. D. Thesis, Civil Engineering, School of Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology Thammasat University, 2005.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายปรีดา พันธุ์พงศ์
วัน เดือน ปีเกิด	7 ตุลาคม 2513
ที่อยู่	24/241 รามอินทรา 55/8 แขวงท่าแร้ง เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10230 โทรศัพท์ 09 4003 3009 Email p.phonphong@gmail.com
การศึกษา	ปี พ.ศ. 2540 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ประสบการณ์การทำงาน	ปี พ.ศ. 2556-ปัจจุบัน บริษัท วีอาร์ซีวิล จำกัด 24/241 รามอินทรา 55/8 แขวงท่าแร้ง เขตบางเขน กรุงเทพฯ 10230 โทรศัพท์ 02-9472940 โทรสาร 02-9472940 ตำแหน่ง: กรรมการบริหาร ปี พ.ศ. 2549-2556 บริษัท ตรีทัช เอนจิเนียริ่ง จำกัด 301/391 ซอยรามคำแหง 68 (สุภาพงษ์ 2) ถนนรามคำแหง แขวงหัวหมาก เขตบางกะปิ กรุงเทพฯ 10240 โทรศัพท์ 02-3762920-1 โทรสาร 02-3762786 ตำแหน่ง: ผู้จัดการฝ่ายก่อสร้าง วิศวกรที่ปรึกษา และวิศวกรควบคุมงาน ปี พ.ศ. 2543-2544 บริษัท พันธกิจ วิศวกรรม จำกัด 897-899 ถนนพัฒนาการ ไปสถานีหัวหมาก แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250 ตำแหน่ง: วิศวกรโครงการ ปี พ.ศ. 2540-2542 บริษัท วีคอม คอนสตรัคชั่น จำกัด 3104/14-15 ซอยลาดพร้าว 130 แขวงวังทองหลาง เขตบางกะปิ กรุงเทพฯ 10240 โทรศัพท์ 02-7311570-1 ตำแหน่ง: วิศวกรประมาณราคา และวิศวกรโครงการ