การศึกษาคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

STUDY OF SUITABLE CONCRETE FOR SULFATE ENVIRONMENT

นรากร สุดทำนอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

นรากร สุดทำนอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

This thesis consists of research materials conducted at the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi and hence the copyright owner. I hereby certify that the thesis does not contain any forms of plagiarism.

.....

(นายนรากร สุดทำนอง)

COPYRIGHT © 2019 ลิขสิทธิ์ พ.ศ. (2562)
FACULTY OF ENGINEERING คณะวิศวกรรมศาสตร์
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต Study of Suitable Concrete for Sulfate Environment
ชื่อ – นามสกุล	นายนรากร สุดทำนอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ำมาตร, ปร.ด.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์นิรชร นกแก้ว, วศ.ม.
ปีการศึกษา	2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

จตุพล ตั้งปกาศิต ..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.)

ปานเทพ จุลนิพิฐวงษ์ ..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปานเทพ จุลนิพิฐวงษ์, D.Eng.)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จินดารัตน์ มณีเจริญ, D.Eng.)

นิรชร นกแก้ว ..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์นิรชร นกแก้ว, วศ.ม.)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ำมาตร, ปร.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 18 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2563

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต
ชื่อ - นามสกุล นายนรากร สุดทำนอง
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ำมาตร, ปร.ด.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์นิรชร นกแก้ว, วศ.ม.
ปีการศึกษา 2562

บทคัดย่อ

สารละลายซัลเฟตเป็นสาเหตุหนึ่งที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีต โดยเมื่อสารละลายซัลเฟตซึมผ่านสู่ภายในเนื้อคอนกรีตเข้าทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ ก่อให้เกิดการผุกร่อน พองตัว และแตกร้าว ส่งผลให้โครงสร้างของคอนกรีตเสียหาย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการพัฒนาคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต โดยพิจารณาถึงกลไกการทำลายของสารละลายซัลเฟต วิธีการประเมินการต้านทานซัลเฟต ผลกระทบที่มีต่อการทำลายของสารละลายซัลเฟต และเลือกใช้คอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่สัมผัสสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

ผลการศึกษาพบว่า กลไกการทำลายโดยสารละลายโซเดียมซัลเฟตขึ้นอยู่กับการเกิดแอตทริงไจต์ซึ่งมีเสถียรภาพ ทำให้การขยายตัวมากขึ้นในซีเมนต์เพสต์ ในขณะที่กลไกการทำลายโดยสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น เป็นการเปลี่ยนแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งไม่มีความสามารถในการยึดประสาน ทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของผิวซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว และเกิดการสะสมของยิปซั่มและบลูไซต์ โดยไม่เกิดการขยายตัวมากเหมือนการทำลายโดยสารละลายโซเดียมซัลเฟต และพบว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตสามารถประเมินการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตโดยวัดการขยายตัวได้ ในขณะที่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้นต้องประเมินการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต โดยวัดการขยายตัวควบคู่กับการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์/คอนกรีต หรือควบคู่กับการลดลงกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์/คอนกรีต นอกจากนี้พบว่า ชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานของคอนกรีต ชนิดของสารละลายซัลเฟต ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต และสภาวะเปียกสลับแห้งของสารละลายซัลเฟต มีผลต่อการเลือกใช้คอนกรีตให้เหมาะสมในสิ่งแวดล้อมซัลเฟต และสุดท้ายสามารถเลือกใช้คอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่สัมผัสสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

คำสำคัญ : คอนกรีต สิ่งแวดล้อมซัลเฟต การขยายตัว การสูญเสียน้ำหนัก การลดลงกำลังอัด

Thesis Title Study of Suitable Concrete for Sulfate Environment
Name - Surname Mr. Naragon Sudthamnong
Program Civil Engineering
Thesis Advisor Associate Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
Thesis Co-Advisor Associate Professor Nirachon Nokkeaw, M.Eng.
Academic Year 2019

ABSTRACT

Sulfate solution is one of the causes of concrete deterioration. The sulfate solution penetrates inside the concrete and reacts with cement paste causing corrosion, swelling and cracking resulting in damage to the structure of the concrete.

The objective of this research was to examine the development of concrete suitable for sulfate environment by considering the destruction mechanism of the sulfate solution, methods for assessing sulfate resistance, effect on the destruction of sulfate solutions and then to choose suitable concrete for concrete exposed to the sulfate environment.

The study results revealed that the mechanism of destruction by sodium sulfate solution was based on the formation of ettringite which was stable causing more expansion in cement paste while the mechanism of destruction by the magnesium sulfate solution is the conversion of calcium silicate hydrate to magnesium silicate hydrate, which did not have the ability to bind resulting in the softening and deterioration of the hardened cement paste surface and the formation of gypsum and blucite. The destruction by the magnesium sulfate solution did not expand as much as the destruction by the sodium sulfate solution. Furthermore, in the sodium sulfate solution, the sulfate resistance of concrete was assessed by measuring the expansion of specimens only while in the magnesium sulfate solution, the sulfate resistance of the concrete must be evaluated by measuring the expansion including weight loss or by measuring the expansion including strength reduction of specimens. In addition, the type and replaced quantity of binder in concrete, type of sulfate solution, sulfate solution concentration, water to cement ratio of concrete, and wet and dry conditions

of the sulfate solution affecting the selection of concrete to be suitable in the sulfate environment. Finally, the suitable concrete was chosen for concrete exposed to the sulfate environment.

Keywords: concrete, sulfate environment, expansion, weight loss, strength reduction

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของรองศาสตราจารย์ ดร.ปิติศานต์ กร้ำมาตร อาจารย์ที่ปรึกษา และรองศาสตราจารย์ นิรชร นกแก้ว อาจารย์ที่ปรึษาร่วม ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานเทพ จุลนิพิฐวงษ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินดารัตน์ มณีเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความกรุณา ในการแก้ไขข้อพกพร่องต่างๆ ของงานวิจัย รวมทั้งสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้โอกาสในการศึกษาต่อ

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยส่งเสริมและเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยตลอดมา

นรากร สุดทำนอง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... (3)

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... (4)

กิตติกรรมประกาศ..... (6)

สารบัญ..... (7)

สารบัญตาราง..... (9)

สารบัญรูป..... (11)

บทที่ 1 บทนำ..... 19

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 19

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา..... 20

1.3 ขอบเขตของการศึกษา..... 20

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 21

บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 22

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 22

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 40

บทที่ 3 วิธีการศึกษา..... 45

3.1 กลไกการทำลายคอนกรีตโดยซัลเฟต..... 45

3.2 ขั้นตอนวิธีการประเมินการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต..... 46

3.3 ผลกระทบที่มีต่อการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต..... 48

3.4 การพิจารณาวิเคราะห์เลือกใช้คอนกรีตให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมซัลเฟต..... 55

บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์..... 56

4.1 กลไกการทำลายคอนกรีตโดยสารละลายซัลเฟต..... 56

4.2 ขั้นตอนวิธีการประเมินการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต..... 59

4.3 ผลกระทบที่มีต่อการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต..... 65

4.4 วิเคราะห์พัฒนาคอนกรีตเพื่อเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมซัลเฟต..... 109

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย..... 111

บรรณานุกรม..... 112

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก..... 114

ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่..... 115

ประวัติผู้เขียน..... 137

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 24

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5..... 26

ตารางที่ 2.3 สารประกอบในน้ำทะเลโดยประมาณ..... 36

ตารางที่ 2.4 ข้อแนะนำสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติในสภาวะแวดล้อมของซัลเฟต..... 40

ตารางที่ 3.1 การเตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟต..... 50

ตารางที่ 3.2 การเตรียมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต..... 50

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อ เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5..... 68

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5..... 71

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อ เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1..... 73

ตารางที่ 4.4 ผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5..... 76

ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5..... 79

ตารางที่ 4.6 ผลการศึกษาการขยายตัวของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1..... 80

ตารางที่ 4.7 ผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อ เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5..... 83

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.8 ผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5..... 86
ตารางที่ 4.9 สรุปผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์..... 89
ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบผลกระทบของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานซัลเฟตเมื่อพิจารณาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต โดยเทียบสารละลายโซเดียมซัลเฟต (NS)..... 92
ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบผลกระทบของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานซัลเฟตเมื่อพิจารณาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ โดยเทียบสารละลายโซเดียมซัลเฟต (NS)..... 95
ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบผลกระทบของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานซัลเฟตเมื่อพิจารณาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ โดยเทียบสารละลายโซเดียมซัลเฟต (NS)..... 98
ตารางที่ 4.13 ผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักจากผลกระทบจากสภาวะเปียกสลับแห้งต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะเปียกตลอดเวลา..... 109
ตารางที่ 4.14 สรุปผลการเปรียบเทียบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตเนื่องจากผลกระทบที่มีต่อการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5..... 110

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การพัฒนากำลังอัดของ C3S , C2S , C3A และ C4AF..... 25

รูปที่ 3.1 เครื่อง Compression Testing Machine..... 48

รูปที่ 3.2 แท่งตัวอย่างคอนกรีตในแบบหล่อ ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร..... 48

รูปที่ 3.3 ระบบการหมุนเวียนสารละลาย ในสภาวะเปียกสลับแห้ง..... 51

รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของระบบการหมุนเวียนสารละลาย ในสภาวะเปียกสลับแห้ง..... 52

รูปที่ 3.5 ปั๊มสูบน้ำหมุนเวียนสารละลาย..... 52

รูปที่ 3.6 ผังแสดงระบบการหมุนเวียนสารละลายของเครื่องตั้งเวลาเปิดปิดอัตโนมัติ..... 54

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 392 วัน..... 57

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 392 วัน..... 58

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย..... 59

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของ ตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน..... 60

รูปที่ 4.5 การขยายตัวของตัวอย่างของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุประมาณ 1,400 วัน..... 60

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 5..... 61

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน..... 62

รูปที่ 4.8 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ อายุประมาณ 1,400 วัน..... 62

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าวการลดลงของกำลังอัดกับร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 560 วัน..... 63

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัว การลดลงของกำลังอัด และการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายโซเดียมซัลเฟต..... 64

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัว การลดลงของกำลังอัด และการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต..... 65

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เถ้าลอย ผงหินปูน ซิลิกาฟูม โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 66

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่าง มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เถ้าลอย ผงหินปูน ซิลิกาฟูม โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 66

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย เถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 67

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 69

รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 69

รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55..... 70

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เถ้าลอย และ ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55 72

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย ตะกรันเตาถลุงเหล็กเถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55..... 72

รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอย ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 74

รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอย ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 74

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 75
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 77
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอย ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 77
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 78
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย เถ้าลอย ผงหินปูน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 79
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40..... 81
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40..... 81

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40..... 82

รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 84

รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 84

รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้งและ ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 85

รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย เถ้าลอยแห้ง และ ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 90

รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอยแห้ง และ ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 90

รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และ สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 91

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้ง และ ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 93

รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้ง และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 93

รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 94

รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้ง และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 96

รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอยแห้ง และ ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 96

รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 97

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ แทนที่ด้วย เถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 99

รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และ ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 100

รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และ ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 100

รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 10 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และ ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 101

รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 15 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และ ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 101

รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และ ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 102

รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15, 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 102

รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้น ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท ที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55..... 103

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40 และ 0.55..... 104
รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40 และ 0.55..... 105
รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยผสมผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40 และ 0.55..... 105
รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40 และ 0.55..... 106
รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40 และ 0.55..... 106
รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยผสมผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40 และ 0.55..... 107
รูปที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40 และ 0.55 107
รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน โดยอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง (W\D) และเปียกตลอด (W)..... 108

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน โดยอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง (W\D) และเปียกตลอด (W)..... 109

บทที่ 1
บทนำ

บทนำเป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตของการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ มีรายละเอียดดังนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีความสำคัญมาก ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีต ผู้ออกแบบจะคำนึงถึง กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ค่าอัตราส่วนปัวซอง เป็นต้น โดยจะออกแบบให้โครงสร้างคอนกรีตแข็งแรงเพียงพอในการรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย แต่ในปัจจุบันความแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีตยังต้องขึ้นอยู่กับความคงทนของเนื้อคอนกรีตจึงต้องมีการพัฒนาการออกแบบส่วนผสมหรือการพัฒนาองค์ประกอบของคอนกรีตให้มีการใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ทำให้คอนกรีตมีการต้านทานสารเคมีที่ทำให้เกิดอันตรายต่อโครงสร้างทำให้เกิดการแตกร้าว ของโครงสร้าง และยังต้องคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมและการนำสิ่งแวดล้อมมา ประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อลดมลพิษในจากการทำลายสารเคมีพวกนี้ และยังเป็นการนำสารเคมีกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์หาก พิจารณาประโยชน์จากการใช้วัสดุมาทดแทนปูนซีเมนต์โดยเฉพาะกรณีวัสดุเหลือใช้จากอุสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์นอกจากนี้ยังสามารถต้นทุนการผลิตและพัฒนาคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้นรวมทั้งสามารถแก้ปัญหาการกำจัดของเสียและช่วยประหยัดพลังงานโดยรวมของประเทศอาทิเช่น พลังงานในการระเบิดภูเขาหินปูน และพลังงานที่ใช้ในการย่อยหินเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ ในการผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถยืดระยะเวลาในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ยาวนานยิ่งขึ้นอีกด้วย

ผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่เกิดกับโครงสร้างคอนกรีตทั้งที่เสริมเหล็กและไม่เสริมเหล็กที่เห็นได้ชัด คือ สภาพแวดล้อมที่มีสารซัลเฟต ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีต เนื่องจากสารละลายซัลเฟตสามารถซึมผ่านสู่ภายในเนื้อคอนกรีตเข้าทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ ก่อให้เกิดการผุกร่อน พองตัว และแตกร้าว ส่งผลให้โครงสร้างของคอนกรีตเสียหาย ตัวอย่างของโครงสร้างที่มีโอกาสเสื่อมสภาพจากการทำลายโดยซัลเฟต เช่น โครงสร้างใต้ดิน โครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำทะเล หรือโครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำเสีย สำหรับปัญหาของสารละลายซัลเฟตก็นับได้ว่าเป็นปัญหาหลักที่สำคัญอย่างหนึ่งของความทนทานคอนกรีตในกรณีที่โครงสร้างคอนกรีตต้องสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟต เช่น ในน้ำทะเล หรือในดินปนเปื้อน เป็นต้น โดยที่โครงสร้างคอนกรีตทั่วไปที่ต้องสัมผัสกับ

สภาพแวดล้อมที่มีสารซัลเฟต (SO_4^{2-}) ที่อยู่ในรูปของสารละลายซัลเฟตสามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ ตัวอย่างของซัลเฟตที่พบมากในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อคอนกรีต เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) เป็นต้น ความเสียหายจากซัลเฟตที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตนั้น จะเกิดการผุกร่อน พองตัว และแตกร้าวอย่างรุนแรง ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟตและความชื้น

สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายของซัลเฟตต่อคอนกรีตนั้นมีปัจจัยหลายๆ ปัจจัยที่มีผลหรืออิทธิพลต่อการทำลายคอนกรีต ได้แก่ สิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟตตลอดจนความเข้มข้นของซัลเฟต ความทึบน้ำของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตเข้าไปได้ยาก ลดการทำลายขั้นรุนแรง หรือในกรณีชนิดของปูนซีเมนต์ก็เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายซัลเฟตเช่นเดียวกัน เช่น ปริมาณ C_3A และ C_4AF ในปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และ C_4AF น้อยมีแนวโน้มต้านทานการทำลายของซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A และ C_4AF สูง และปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วน C_2S และ C_3S ต่ำก็มีความสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้นเป็นต้น นอกจากนี้ปริมาณ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตก็เป็นปัจจัยที่สำคัญเช่นกัน กล่าวคือถ้าลดปริมาณของ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตก็ช่วยลดความรุนแรงลงได้ด้วย วิธีการลด $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตอาจทำได้โดยใช้สารวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

ในการศึกษาคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับสิ่งแวดล้อมซัลเฟตในครั้งนี้ เป็นการศึกษาถึงกลไกการทำลายคอนกรีตโดยซัลเฟต และผลกระทบที่มีต่อการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟตประกอบด้วย ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน ผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟต ผลกระทบจากความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และผลกระทบจากเปียกสลับแห้ง เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงกลไกการทำลายคอนกรีตโดยสารละลายซัลเฟต

1.2.2 เพื่อศึกษาขั้นตอนวิธีการประเมินการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

1.2.4 เพื่อศึกษาพิจารณาเลือกใช้คอนกรีตให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมซัลเฟต

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาถึงกลไกการทำลายคอนกรีตโดยสารละลายซัลเฟต

1.3.2 ศึกษาขั้นตอนวิธีการประเมินการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

1.3.3 ศึกษาผลกระทบที่มีต่อการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต ในการศึกษาครั้งนี้พิจารณาผลกระทบ ประกอบด้วย

1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

2) ผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟต

3) ผลกระทบจากความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต

4) ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

5) ผลกระทบจากเปียกสลับแห้ง

1.3.4 ศึกษาวิเคราะห์พัฒนาคอนกรีตเพื่อเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมซัลเฟต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบศึกษาถึงกลไกการทำลายคอนกรีตโดยสารละลายซัลเฟต

1.4.2 ทราบศึกษาขั้นตอนวิธีการประเมินการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

1.4.3 ทราบศึกษาผลกระทบที่มีต่อการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

1.4.4 ทราบการเลือกใช้คอนกรีตให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมซัลเฟต

1.4.5 ทราบแนวทางการออกแบบสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ปูนซีเมนต์และกรรมวิธีการผลิต

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีต ที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับงานที่นำไปใช้ นอกจากนี้ยังมีปูนซีเมนต์อื่นที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เหมาะกับงานที่หลากหลาย โดยเฉพาะด้านความแข็งแรง ความทนทาน ความสวยงาม และการใช้งานเฉพาะด้าน คุณสมบัติของปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่เป็นวัตถุดิบและกรรมวิธีการผลิต สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันในขั้นตอนการเผาเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ การปรับส่วนประกอบของวัตถุดิบจะทำให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ในปัจจุบันแตกต่างจากเดิมบ้างแต่ยังคงใช้วัสดุหลักที่ใช้ในสมัยแรก และให้ความสำคัญที่คุณภาพของปูนซีเมนต์ที่ผลิตและประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต การผลิตปูนซีเมนต์มีความแพร่หลายและได้รับความนิยมสูงเพราะวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีปริมาณมากและหาได้ง่ายในที่ต่าง ๆ ทั่วโลก ได้แก่ วัสดุธาตุปูน เป็นออกไซด์ของธาตุแคลเซียม วัสดุอาจิลลาเชียส เป็นออกไซด์ของธาตุซิลิกอน และอลูมิเนียม ในบางครั้ง ดินที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีทั้งออกไซด์ของแคลเซียมและซิลิกอน นอกจากนี้ การผลิตปูนซีเมนต์ยังต้องการวัตถุดิบอย่างอื่น ได้แก่ ออกไซด์ของเหล็ก ซึ่งได้จากดินลูกรัง ออกไซด์ของอลูมิเนียมและเหล็กช่วยให้ปฏิกิริยาในเตาเผาเกิดได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังต้องการยิปซัม เพื่อหน่วงปฏิกิริยาไม่ให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวเร็วเกินไป โดยบดร่วมกับปูนเม็ด ในขั้นตอนสุดท้าย

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งออกเป็นสองแบบ คือ กระบวนการผลิตแบบเปียกและกระบวนการผลิตแบบแห้ง การเลือกกระบวนการผลิตแบบใดขึ้นอยู่กับความชื้นของวัตถุดิบในสภาพธรรมชาติ ความแข็งของวัตถุดิบ และชนิดของวัตถุดิบ ที่ความชื้นช่วงหนึ่งการบดวัตถุดิบให้ละเอียดจะทำได้ยาก จำเป็นต้องขจัดความชื้นที่มีอยู่หรือเพิ่มน้ำให้มีปริมาณมากขึ้น ถ้าวัตถุดิบเป็นดินเหนียวจะมีความชื้นสูง ดังนั้นจึงใช้กระบวนการผลิตแบบเปียก หากวัตถุดิบเป็นหินและหินเชลจะมีความชื้นค่อนข้างต่ำจึงควรใช้กระบวนการผลิตแบบแห้ง ในปัจจุบันนิยมกระบวนการผลิตแบบแห้งเพราะค่าใช้จ่ายถูกกว่ากระบวนการผลิตแบบเปียกมาก เตาเผาของระบบแห้งมีขนาดเล็กกว่าระบบเปียกและพลังงานที่ใช้ในการเผาจะน้อยกว่าของระบบเปียกมาก

โดยกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์สามารถแบ่งออกเป็นสองลักษณะของการผลิต

1) กระบวนการผลิตแบบเปียก วัตถุดิบจะถูกผสมกับน้ำตามสัดส่วนที่กำหนด ถ้าใช้ดินเหนียวและหินชอล์กจะใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อน้ำประมาณ 1:3 จากนั้นบดส่วนผสมให้ละเอียดในหม้อบดละเอียดเปียก (Wash Mill) น้ำโคลนข้นที่ได้จากการบด นำไปผ่านตะแกรงแล้วส่งเข้าเตาเผา วัตถุดิบที่ป้อนเข้าเตาเผาจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 35 ถึง 50

2) กระบวนการผลิตแบบแห้ง วัตถุดิบจะถูกนำมาย่อยให้เล็กลงในเครื่องย่อยขั้นต้น (Primary Crusher) และเครื่องย่อยขั้นที่สอง (Secondary Crusher) ตามลำดับ จากนั้นจึงนำวัสดุไปบดละเอียดในหม้อบดวัตถุดิบ (Raw Mill) แล้วผสมกันตามสัดส่วนที่ต้องการในไซโลผสมวัตถุดิบ (Blending Silo) จากนั้นเพิ่มความร้อนของวัตถุดิบด้วยลมร้อนก่อนส่งเข้าเตาเผา ในกรณีของกระบวนการผลิตแบบกึ่งแห้ง (Semi-dry process) จะนำวัตถุดิบไปทำเป็นเม็ดโดยการเติมน้ำเล็กน้อยและผ่านเข้าไปในเครื่องทำเม็ด (granulator) วัตถุดิบจะจับกันเป็นก้อนกลมขนาดประมาณ 12 มิลลิเมตร เพื่อง่ายต่อการนำวัตถุดิบเข้าเตาเผาวัตถุดิบจะมีความชื้นร้อยละ 12

2.1.2 สารประกอบหลักและคุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์

โดยปกติในปูนซีเมนต์จะมีสารประกอบหลักคือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต $3CaO.SiO_2$ (C_3S) ไดแคลเซียมซิลิเกต $2CaO.SiO_2$ (C_2S) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต $3CaO.Al_2O_3$ (C_3A) และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) เนื่องจากมีปริมาณมากถึง ร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติและคุณภาพของปูนซีเมนต์

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

C_3S มีอยู่มากที่สุดในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 45 ถึง 55 มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมสีเทาแก่ที่อุณหภูมิในเตาเผา 1250 องศาเซลเซียส C_3S สามารถสลายตัวได้ แต่สลายตัวค่อนข้างช้า เมื่ออุณหภูมิลดลงที่ 700 องศาเซลเซียส C_3S จะมีเสถียรภาพและจะไม่เปลี่ยนแปรสภาพเมื่อผสม C_3S กับน้ำจะเกิดการก่อตัวและแข็งตัว ให้กำลังค่อนข้างดีในช่วงเวลา 7 วันแรก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำทำให้เกิดความร้อนปานกลางประมาณ 500 จูล/กรัม ซึ่ง C_3S จะคลายความร้อนออกมา โดยปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า เรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Heat of Hydration)

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

C_2S มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 15 ถึง 35 จะมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิปกติ C_2S มีลักษณะเป็นเม็ดกลมและแสดงลักษณะทวินนิง (Twinning) เมื่อผสมกับน้ำ

สามารถทำปฏิกิริยาเกิดความร้อนขึ้น ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกล่าวค่อนข้างต่ำประมาณ 250 จูล/กรัม และการพัฒนากำลังช้ากว่า C_3S มาก เริ่มให้กำลังหลังจาก 4 สัปดาห์ขึ้นไป

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

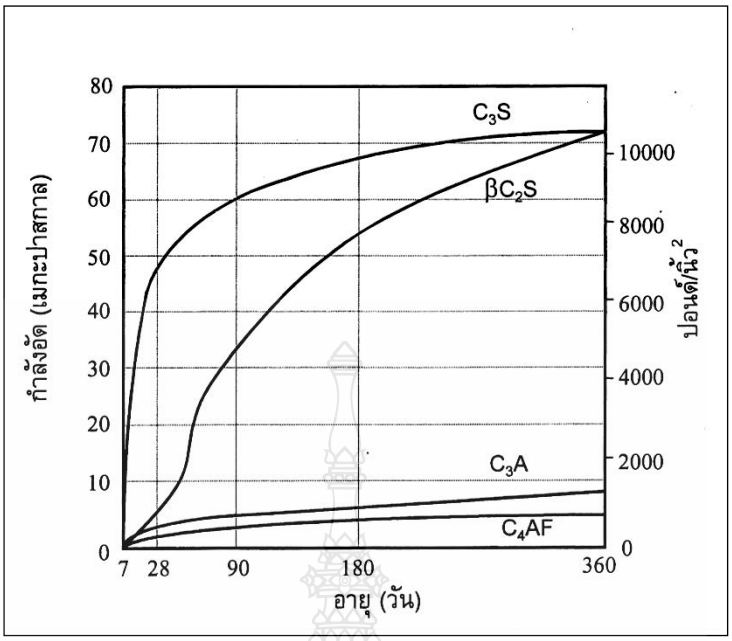
C_3A มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 7 ถึง 15 ลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมีสีเทาอ่อน ปฏิกิริยากับน้ำมีความรุนแรงมากทำให้เพสต์ก่อตัวทันที ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมีค่าสูงมากคือ 880 จูล/กรัม การพัฒนากำลังของ C_3A จะเกิดขึ้นเร็วมาก สามารถพัฒนาได้ภายในวันเดียว แต่กำลังประลัยค่อนข้างต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับ C_3S หรือ C_2S

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

C_4AF มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 และอยู่ในสภาพสารละลายแข็ง (Solid Solution) เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาและทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมีค่าปานกลางประมาณ 420 จูล/กรัม C_4AF มีการพัฒนาได้รวดเร็วเช่นเดียวกับ C_3A แต่กำลังประลัยที่ได้ค่อนข้างต่ำกว่า C_3A เล็กน้อย

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [1]

คุณสมบัติ	สารประกอบ			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
อัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วกว่า (นาที)
การพัฒนากำลัง	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (1 วัน)	เร็วมาก (1 วัน)
กำลังประลัย	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง



รูปที่ 2.1 การพัฒนากำลังอัดของ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF [1]

2.1.3 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และการใช้งาน

จากการศึกษาในปัจจุบันปูนซีเมนต์ มีการใช้งานของปูนซีเมนต์ในหลายด้านตามลักษณะของงานนั้น อิทธิพลของสารประกอบทำให้สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของปูนซีเมนต์เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานตามลักษณะแต่ละประเภทต่าง มาตรฐานการทดสอบวัสดุ ASTM C150 ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็น 5 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2.2 เพื่อให้มองเห็นองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ใช้กันมากในงานคอนกรีต สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตที่ไม่ต้องการคุณสมบัติที่พิเศษ ใช้ในงานก่อสร้างที่เป็นโครงร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป เช่น เสา คาน ฐานราก ของงานอาคารหรืองานถนน เป็นต้น ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังสูงที่ในระยะเวลาไม่รวดเร็วมากนักและให้ความร้อนปานกลาง

2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2

ปูนซีเมนต์ตัดแปลง (Modified Cement) ให้ความร้อนไม่สูงมากนัก แต่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (ประเภทที่ 4) ให้กำลังอัดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับใช้ในการทำคอนกรีต หรือ

ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่เกิดความร้อน และทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตได้ปานกลาง

3) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (Rapid Hardening Portland Cement) จะให้กำลังสูงในระยะแรก ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสูงเพราะมีปริมาณ C_3A สูง ความละเอียดสูงกว่าประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับงานที่ต้องใช้งานเร็ว เช่น งานซ่อมแซม หรืองานต้องการถอดแบบเร็ว

4) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) จะให้ความร้อนต่ำมาก เพราะมีปริมาณ C_3S ต่ำ โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 แต่จะมี C_2S ค่อนข้างสูง ประมาณร้อยละ 50 ถึง 60 เหมาะสำหรับใช้งานคอนกรีตหลา เช่น เขื่อนคอนกรีตหรือตอม่อขนาดใหญ่ หรืองานคอนกรีตที่ต้องการน้ำหนักตัวมันเองมากๆ

5) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Surfate Resisting Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ต้านทานซัลเฟตได้สูง มีปริมาณของ C_3A ต่ำมาก โดยทั่วไปไม่เกินร้อยละ 5 เพราะ C_3A จะทำให้เกิดการรวมตัวซัลเฟตได้ง่าย ดังนั้น C_3A มีปริมาณน้อยจึงมีการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยลงหรือไม่ได้เลย ทำให้การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตได้น้อยลง เหมาะสำหรับงานคนอกรีตที่สร้างอยู่ในพื้นที่ ที่มีเกลือหรือสารละลายซัลเฟต

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5 [1]

ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติม	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท 3	ประเภท 4	ประเภท 5
C_3A	49	46	56	52	30
C_2S	25	29	15	50	46
C_3A	12	6	12	5	5
C_4AF	8	12	8	12	13
ความละเอียด (เบลน,ซม^2/กรัม)	3,000	3,000	4,500	3,000	3,000
กำลังอัด (3 วัน,กก/ซม^2.)	180	150	310	80	120
ความร้อนปฏิกิริยา (28 วัน,จูล/กรัม)	400	330	430	270	310

หมายเหตุ* กำลังอัดจากลูกบาศก์มอร์ต้าร์ ขนาด 50 x 50 x 50 มม.

2.1.4 ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

1) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, $3CaO.2SiO_2 3H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide : $Ca(OH_2)$ หรือ CH) ดังสมการที่ 2.1

$$2(3CaO.SiO_2)+6H2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2 3H2O+3Ca(OH)_2 \quad (2.1)$$

2) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH ดังสมการที่ 2.2

$$2(2CaO.SiO_2)+4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2 3H_2O+Ca(OH)_2 \quad (2.2)$$

3) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2.3

$$3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O \quad (2.3)$$

เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (Clinker) โดยยิปซัม (Gypsum : $CaSO_4.2H_2O$) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนต ก่อให้เกิดชั้นบางๆของแอทริงไจท์ (Ettringite : $3CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.31H_2O$) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต ดังสมการที่ 2.4

$$3CaO.Al_2O_3+Ca.SO_4.2H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.31H_2O \quad (2.4)$$

4) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซัม ดังสมการที่ 2.5

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

เนื่องจากปูนซีเมนต์มี C_3S เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ ซึ่งบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ C_3A ด้วย ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะลดลงเนื่องจากการเกิดชั้นเคลือบของแอทริงไจท์ และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของอิออนแคลเซียม และไฮดรอกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาลดลง และเพสต์มีสภาพพลาสติกช่วงหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึก และปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ทำให้เกิด CSH เพิ่มมากขึ้น ตามด้วยปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้แอทริงไจท์เปลี่ยนเป็น แคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมิเนตและเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต และซัลโฟเฟอไรท์ แคลเซียมซิลิเกตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น และขยายเข้าไปในโพรงและเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.1.5 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) คือวัสดุที่มีซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติยึดประสานได้ แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมาก ผสมกับน้ำในปริมาณที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ดังสมการที่ 2.6 หรือ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ดังสมการที่ 2.7 ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ ถึงแม้วัสดุปอซโซลานจะสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ แต่ในบางครั้งวัสดุปอซโซลานจะไม่สามารถจะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้เนื่องจาก องค์ประกอบทางเคมีไม่เพียงพอต่อขบวนการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

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

วัสดุปอซโซลานสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

1) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Pozzolan)

ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ก่อนนำมาใช้งานต้องทำการบดให้ ละเอียดก่อน วัสดุปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่พบส่วนมากได้แก่ เถ้าภูเขาไฟ (Volcanic Ash), หินชั้น (Shale), หินปูน (Limestone) เป็นต้น

2) ปอซโซลานดัดแปลง (Modify Pozzolan)

ปอซโซลานดัดแปลงนั้นคือส่วนที่เหลือจากขบวนการผลิตในโรงงาน อุตสาหกรรม เช่น เถ้าลอย (Fly Ash) และ เถ้าหนัก (Bottom Ash) ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการเผา ไหม้ในผลิตกระแสไฟฟ้า หรือ ตะกันเตาถลุงเหล็ก (Slag) ซึ่งได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติวัสดุประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลานเกิดเป็น สารประกอบที่เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ ซึงสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้ มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานปฏิกิริยาขึ้นที่เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) สรุปเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้

กรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ

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

กรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ

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

2.1.6 ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Ground Granulated Blast-Furnace Slag)

ตะกรันเตาถลุงเหล็กคือผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่โลหะซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิเกตและอลูมิโนซิลิเกตของแคลเซียมและอื่นๆ ซึ่งเกิดขึ้นในขณะหลอมละลายพร้อมกับเหล็กในเตาถลุงเหล็ก นอกจากนี้ยังให้คำจำกัดความของเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็กหมายถึงเม็ดวัสดุที่ไม่เป็นผลึกซึ่งได้จากกา ร ทำตะกรันที่หลอมเหลวในเตาถลุง เหล็กให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว โดยการจุ่มลงในน้ำหรือใช้น้ำฉีดเพื่อให้ตะกรันเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว

ตะกรันเตาถลุงเหล็กนอกจากจะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ยังใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาวอิ่มตัว ยิปซัม หรือ แอนไฮไดรต์ ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถใช้ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมหรือใช้เป็นส่วน ผสมแยกต่างหากในการผสมคอนกรีต ซึ่งการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแยกผสมต่างหากในการผสมคอนกรีตมีข้อดี 2 ประการคือ สามารถบดตะกรันเตาถลุงเหล็กให้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการ และสามารถปรับปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กให้เหมาะสมกับงานแต่ละงานได้

คุณสมบัติของซีเมนต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก

1) มีความสามารถในการเทสูงกว่า
2) มีระยะเวลาในการก่อตัวนานกว่า

2.1.7 ฝุ่นหินปูน (Limestone Powder)

ฝุ่นหินปูนเป็นผลพลอยได้จากการย่อยหิน เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยปกติแล้วฝุ่นหินปูนจำนวนมากเหล่านี้มักจะถูกกองเก็บไว้ในบริเวณแหล่งย่อยหินนั้นๆ โดยอนุภาคของฝุ่นหินปูนมีขนาดเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 100 ถึง 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถก่อให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อม และยังส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของผู้ที่อาศัยในบริเวณใกล้เคียงแหล่งย่อยหินเหล่านั้น

ฝุ่นหินปูน (Limestone Powder) ในประเทศไทยมีเหมืองหินปูนที่ทำการผลิตอยู่ 2 แหล่งใหญ่ คือ เหมืองหินปูนโดโลมิติกจังหวัดสระบุรี และเหมืองหินปูนโดโลไมท์จังหวัดกาญจนบุรี

หินปูนโดโลมิติก และโดโลไมท์ เป็นหินคาร์บอเนต โดยหินคาร์บอเนตที่มีองค์ประกอบของแร่โดโลไมท์อยู่ในปริมาณร้อยละ 10 ถึง 50 จะจัดเป็นหินประเภทโดโลมิติก ถ้ามีปริมาณของแร่โดโลไมท์มากกว่าร้อยละ 50 จะจัดเป็นหินประเภทโดโลไมท์ โดยองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของหินปูน จะประกอบด้วยสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ซึ่งมีทั้งในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัตถุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (Inert Material) และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (Reactive Material) มีรายละเอียดดังนี้

1) วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้ทอแทนปูนซีเมนต์ จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจาก คุณสมบัติของวัสดุเองที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี จึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากสารซัลเฟตอีกด้วย ในขณะเดียวกันก็อาจส่งผลต่อกำลังของซีเมนต์เพสต์สารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CoCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี อย่างไรก็ตามสารประกอบทั้งสองดังกล่าวก็สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ถ้าหากสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากพอ หรือให้พลังงานความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาเคมี

$$CaCO_3 + H_2O + Heat \longrightarrow Ca(OH)_2 + CO_2 \quad (2.10)$$

$$MgCO_3 + H_2O + Heat \longrightarrow Mg(OH)_2 + CO_2 \quad (2.11)$$

2) วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ สารประกอบแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ที่เกิดจากสมการข้างต้นนี้ สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ เช่นเดียวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์

ดังนั้นการนำเอาฝุ่นหินปูนมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์จึงมีความเป็นไปได้ที่จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของวัสดุเชื่อมประสาน

$$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 \quad (2.12)$$

2.1.8 เถ้าลอย (Fly ash)

เถ้าลอยเป็นผลผลิตได้จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงสู่ด้านล่างจึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ถึง 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอยโดยเถ้าลอยจะถูกดับจับด้วยไฟฟ้าสถิตย์เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะ เถ้าเถ้าลอยถือได้ว่าเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งซึ่งสามารถใช้เป็นส่วนผสมหรือแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการทำคอนกรีตได้แต่เถ้าลอยที่ใช้จะเป็นวัสดุ

ปอซโซลานที่ดีมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเถ้าถ่านหินนั้น ความละเอียดของเถ้าลอย(Fly Ash)เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปจะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ ลักษณะทั่วไปจะเป็นรูปทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.001 มม.) จนถึง 0.15 มม. ซึ่งจะพบว่าเถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นทรงกลมตัน ความละเอียดและรูปร่างของเถ้าลอยยังขึ้นอยู่กับการบดถ่านหินที่จะนำไปเผา ชนิดของเครื่องบด และชนิดของเตาเผา กล่าวคือ ถ้าบดถ่านหินละเอียดมากขึ้นและเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเตาเผา จะทำให้ได้เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงกว่า เมื่อใช้ถ่านหินที่บดหยาบกว่าหรือเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์จะได้เถ้าลอยที่มีความละเอียดต่ำกว่า ความถ่วงจำเพาะ ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยอยู่ระหว่าง 2.2-2.8 เมื่อทำการแยกเถ้าลอยให้มีขนาดเล็กลง ความถ่วงจำเพาะจะสูงขึ้น เพราะเถ้าลอยขนาดใหญ่มักมีรูพรุนมากกว่าขนาดเล็ก

ศักยภาพของเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์ มีรายงานที่เกี่ยวกับการนำเถ้าลอยมาใช้แทนปูนซีเมนต์โดย Davisและคณะ ตั้งแต่เมื่อปี พ.ศ.2480 ถือได้ว่าเป็นก้าวแรกของการนำเถ้าลอยมาใช้งานคอนกรีต หลังจากนั้นมีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์อีกจำนวนมาก และมีการนำเถ้าลอยไปใช้ในงานจริงเป็นจำนวนมากด้วยเช่นกัน ธาตุเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี ปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้นเมื่อใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม ประการที่สอง เนื่องจากเถ้าลอยอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กละเอียดและเป็นเม็ดกลม ดังนั้นอนุภาคเหล่านี้เมื่อผสมในคอนกรีตจะเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างเล็กๆ ระหว่างปูนซีเมนต์ ทราย และหิน การที่เถ้าลอยเข้าไปแทรกตัวอยู่ในช่องว่างของคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น และเนื่องจากเถ้าลอยมีสัณฐาน เป็นทรงกลมจะทำให้คอนกรีตมีการลื่นไหลได้ดีขึ้น นอกจากนี้ ยังทำให้การปั๊มหรือเทคอนกรีตลงในแบบทำได้สะดวกขึ้นอีกด้วย เมื่อผสมเถ้าลอยบางส่วนเข้าไปในส่วนผสมคอนกรีตกำลังอัดคอนกรีตที่อายุต้นๆจะต่ำลง มีรายงานว่าการใช้เถ้าลอยแบบ Class F แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 จะทำให้คอนกรีตที่อายุ 1 วันมีค่าเพียงร้อยละ 50 ของกำลังอัดคอนกรีตในส่วนผสมเดียวกัน ที่ไม่ได้ใส่เถ้าลอย การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 25 และ 35 จะทำให้ทำให้กำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 7 วัน มีค่าประมาณร้อยละ 75 และ 65 ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย แต่ว่าค่ากำลังอัดคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเหล่านี้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 90 และ 85 ตามลำดับ ของกำลังอัดคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าลอยผสมอยู่ในคอนกรีตนี้ มีอายุ 6 เดือน และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ การใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงจะสามารถแก้ปัญหากำลังอัดต่ำของคอนกรีตในช่วงอายุต้นๆได้

องค์ประกอบทางเคมี องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าเถ้าลอยคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) , อะลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริคออกไซด์ (Fe_2O_3) อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ สภาพแวดล้อมขณะเผา และชนิดของถ่านหินที่ใช้เผา ด้วยเหตุผลนี้ ASTM C618 จึงได้แยกประเภทของเถ้าลอยไว้ 2 ชนิด คือ Class C และ Class F โดย

Class F มีปริมาณ $SiO_2 + Al_2O_2 + Fe_2O_2$ มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และ Class C จะมีปริมาณของออกไซด์ดังกล่าว ระหว่างร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก ส่วนใหญ่แล้วถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) สับบิทูมินัส (Sub-bituminus) เมื่อเผาแล้วจะให้เถ้าลอย Class C ส่วนถ่านหินชนิดแอนทราไซด์ (Anthracite) บิทูมินัส (Bituminus) จะให้เถ้าลอย Class F สำหรับโรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นวัตถุดิบในการให้ความร้อน แต่เถ้าลอยที่ได้มีทั้ง Class F และ Class C การที่เถ้าลอยจากแหล่งเดียวกัน แต่สามารถพบเถ้าลอยได้ทั้ง Class F หรือ Class C เป็นเรื่องปกติเพราะถ่านหินเป็นวัสดุธรรมชาติมีเนื้อไม่สม่ำเสมอ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีย่อมเปลี่ยนไป แต่โดยสรุปก็คือเถ้าลอยที่ได้เป็น Class F หรือ Class C ต่างก็ศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีต

ปฏิกิริยาปอซโซลาลานของเถ้าลอย (Pozzolanic Reaction) ความสามารถของเถ้าลอยในการรวมตัวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลาน จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าลอยคือ เถ้าลอยที่มีความละเอียดมากปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าเถ้าลอยที่มีความละเอียดน้อยกว่า และในทำนองเดียวกันเถ้าลอยที่มีปริมาณร้อยละของคาร์บอนต่ำก็จะมีการพัฒนากำลังได้ไวเช่นกัน ความไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถวัดได้โดยใช้ค่าดัชนีกำลัง (Strength Activity Index)

$$\text{Strength Activity Index with Portland Cement} = [A/B] \times 100 \quad (2.13)$$

โดย A = กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20

B = กำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐานที่ไม่มีเถ้าลอย

กระบวนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชั่น หลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดขึ้นแล้วจะทำให้ปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นของเหลวข้น (Cement Gel) และในขณะเดียวกันนี้จะเกิดสารประกอบขึ้นมา 2 ชนิด คือ C-S-H และ $Ca(OH)_2$ หลังจากนั้น $Ca(OH)_2$ ทำปฏิกิริยากับ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่มีอยู่ในเถ้าถ่านหินให้สารประกอบมีคุณสมบัติในการยึดประสานทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้นและความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตจะดีขึ้นตามไปด้วย

ปฏิกิริยา Silicate Hydration

$$2C_3S + 6H_2O \longrightarrow CSH + 3Ca(OH)_2 \quad (2.14)$$

ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

$$\text{Fly Ash} + Ca(OH)_2 + H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O \quad (2.15)$$

$CSH = 3CaO.2SiO_2.3H_2O$ = Calcium-Silicate-Hydrate

คุณสมบัติของซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

1) ความต้องการน้ำ

เถ้าลอยมีลักษณะเป็นเม็ดกลมและมีผิวเรียบทำให้ส่วนผสมทำงานได้ง่ายขึ้นและต้องการน้ำลดลงเมื่อกำหนดให้มีความสามารถในการเทเท่ากัน เถ้าลอยนอกจากสามารถลดปริมาณน้ำแล้ว ในหลายกรณีพบว่ายังเพิ่มความสามารถในการทำงานของมอร์ตาร์และคอนกรีตได้โดยคงปริมาณน้ำไว้ ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ทำจากปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 0, 20 และ 40 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีค่าเท่ากับร้อยละ 125,135 และ 145 ตามลำดับ

2) ระยะเวลาก่อตัว

โดยทั่วไประยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง เถ้าลอยที่ละเอียดมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวเร็วขึ้นและในทางกลับกันเถ้าลอยที่หยาบมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวช้าลง เถ้าลอยที่มีปริมาณ SO_3 สูงจะมีเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นมากได้

3) การเยิ้มน้ำ

การผสมเถ้าลอยทำให้ปริมาตรของวัสดุประสานเพิ่มขึ้นเนื่องจากเถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์และทำให้การเยิ้มน้ำของเพสต์และมอร์ตาร์ลดลง การเยิ้มน้ำของคอนกรีตต่ำกว่าเพสต์และมอร์ตาร์เนื่องจากมีปริมาณเพสต์ต่ำกว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีการเยิ้มน้ำลดลงเช่นกัน แต่มีรายงานเช่นกันว่าเถ้าลอย 6 จาก 11 ชนิดที่ทดสอบเพิ่มการเยิ้มน้ำ เมื่อผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากันโดยไม่ลดน้ำ คอนกรีตจะมีความสามารถทำงานได้ดีขึ้นเนื่องจากมีน้ำอิสระ (Free Water) มากทำให้การเยิ้มน้ำเพิ่มขึ้นได้การผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ยังทำให้ส่วนผสมเกาะตัวกันได้ดีเป็นผลให้โอกาสในการเกิดการแยกตัว (Segregation) ของคอนกรีตน้อยลงด้วย

การใช้เถ้าลอยในการป้องกันการกัดกร่อนโดยสารซัลเฟต เถ้าลอยสามารถเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตจากซัลเฟตได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเถ้าลอย Class F จะต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่า Class C การต้านทานการกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานได้เปลี่ยนรูปของ $Ca(OH)_2$ ให้เป็น CSH ซึ่งเป็นสารประกอบที่ทนต่อการกัดกร่อนได้สูงกว่า $Ca(OH)_2$ อย่างมาก การต้านทานการกัดกร่อนยังขึ้นกับ ความละเอียดของเถ้าลอยด้วย ยิ่งละเอียดมากยิ่งช่วยมาก

2.1.9 เถ้าก้นเตา (Bottom Ash)

เถ้าก้นเตา (Bottom Ash) เป็นผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาถ่านหินในอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้า และมีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกับเถ้าลอย (Fly Ash) แต่เถ้าก้นเตามีขนาดค่อนข้างใหญ่และพรุน หากจะนำมาใช้ต้องปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพให้เหมาะสม โดยการบดให้อนุภาคลดลงจึงจะสามารถนำไปใช้ในงานคอนกรีตได้

1) องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตา

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาโดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาจะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของถ่านหิน และชนิดของถ่านหิน องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาประกอบไปด้วยธาตุโลหะประมาณ ร้อยละ 80-90 โดยน้ำหนัก ได้แก่ Si, Fe, Ca, Al, Na, K และส่วนย่อยๆ อีกได้แก่ Mg, Ti, Cl, Mn, Ba, Zn, Cu, Pb และ Cr โดยถ้าก้นเตาส่วนที่ติดอยู่กับตะแกรงก้นเตาประมาณร้อยละ 1-3 จะมี Pb, Al, Cu และ Zn อย่างเข้มข้นสำหรับธาตุอื่นๆ ที่อยู่ในเถ้าก้น เตา เช่น แคลเซียม จะมีมากจากการเผาถ่านหินลิกไนต์และซับบิทูมินัส ส่วนซัลเฟตมีปริมาณน้อยมาก คือประมาณร้อยละ 1 เท่านั้น

2) คุณสมบัติเชิงกลของเถ้าก้นเตา

เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุเม็ดละเอียด พื้นที่ผิวมาก ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าน้อย เป็นวัสดุประเภท Non-plastic มีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าวัสดุมวลรวมชนิดอื่น และมีความต้านทาน การสึกหรอและความคงทนน้อยเมื่อเทียบกับมวลรวมโดยทั่วไป

3) การใช้เถ้าก้นเตาในงานคอนกรีต

เถ้าก้นเตาเป็นสารปอซโซลานสังเคราะห์ มีลักษณะพรุน เป็นเหลี่ยมมุม พื้นที่ผิวจำเพาะมากและดูดซึมน้ำสูง ทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาต้องการน้ำในปริมาณที่เพิ่มขึ้นซึ่งอาจต้องใช้น้ำเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 25-30 แต่การผสมน้ำที่เพิ่มมากขึ้นในคอนกรีตจะส่งผลให้กำลังของคอนกรีตลดลง ดังนั้นอาจจะใช้สารลดน้ำผสมเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีตจะช่วยลดปริมาณในส่วนผสมให้ลดลงได้เพื่อให้คุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมปกติ

2.1.10 ความเสียหายของคอนกรีตชายฝั่งทะเล

ความเสียหายและการเสื่อมสภาพของคอนกรีตบริเวณชายฝั่งทะเลในประเทศไทยโดยทั่วไปมักเกิดจาก 2 สาเหตุหลัก คือ

1) สาเหตุทางกายภาพ เช่น การหดตัว (Shrinkage) การขัดสี (Abrasion) และกระแสน้ำ (Erosion) เป็นต้น สาเหตุเหล่านี้ล้วนเป็นตัวเร่งให้เกิดความเสียหายต่อคอนกรีตโดยตรง

2) สาเหตุทางเคมี เช่น การกัดกร่อนจากซัลเฟต (Sulfate Attack) การกัดกร่อนจากคลอไรด์ (Chloride-Induced Corrosion) เนื่องจากในบริเวณชายฝั่งทะเลหรือในทะเลส่วนใหญ่จะพบสารละลายดังกล่าวนี้มาก

ตารางที่ 2.3 สารประกอบในน้ำทะเลโดยประมาณ

สารประกอบ	ปริมาณ มิลลิกรัมต่อลิตร
Cl^- (Chloride)	19,000
Na^+ (Sodium)	10,500
SO_4^{2-} (Sulfate)	2,700
Mg^{2+} (magnesium)	1,280
Ca2+ (Calium)	412
K+ (Potassium)	399
HCO3- (Bicarbonate)	110
Br- (Bromide)	67
CO32- (Carbonate)	20
Sr2+ (Strontium)	7.9
F- (Fluoride)	1.3
Organics	1 ถึง 2

การเกิดความเสียหายและการเสื่อมสภาพนั้นจะแตกต่างกันตามตำแหน่งของโครงสร้าง โครงสร้างที่อยู่ในบริเวณที่เผชิญกับทะเลเพียงอย่างเดียว (Marine Atmospheric Zone) โดยส่วนใหญ่จะเสียหายจากสาเหตุทางเคมีอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ในเหล็กเสริม ส่วนโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณที่ต้องปะทะกับคลื่นทะเลโดยตรงหรือบริเวณที่ต้องเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเล (Splas Tidal Zone) ความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างบริเวณนี้จะเกิดจากสาเหตุทางกายภาพและทางเคมีพร้อมๆกัน ความเสียหายทางเคมีของโครงสร้างในชิ้นส่วนนี้มักเกิดจากการกัดกร่อนจากคลอไรด์เป็นหลัก สำหรับโครงสร้างที่จมอยู่ในน้ำทะเล (Submerged Zone) จะเสื่อมสภาพจากสาเหตุทางเคมีโดยเกิดจากการกัดกร่อนของซัลเฟต แต่ความเสียหายของโครงสร้างใน

ส่วนนี้หากเปรียบเทียบกับโครงสร้างบริเวณที่ต้องเผชิญกับคลื่นทะเลและบริเวณที่เปลี่ยนแปลงระดับน้ำทะเลแล้วนับว่าเกิดความเสียหายน้อยกว่าอย่างชัดเจน

2.1.11 การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต

การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต (Sulfate Attack) ส่วนใหญ่ เกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) ที่อยู่ในรูปของสารละลายสามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ พบมากในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อคอนกรีต เช่นโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) เป็นต้น โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องก่อสร้างอาคารในบริเวณหรือที่ใกล้เคียงกับทะเล เช่น ตอม่อ ท่าเรือ เขื่อน เป็นต้น การทำลายของซัลเฟตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟตและความชื้น จะไม่แสดงออกเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่จะรุนแรงเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกชื้น และรุนแรงมากในกรณีที่อยู่ในสภาพแห้งสลับเปียก เช่น ในท่อระบายน้ำทิ้ง ในอาคารส่งน้ำเพื่อการชลประทาน ฐานรากและพื้นอาคารในดินที่มีซัลเฟต

1) กลไกของการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟต

เมื่อปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟต กับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ดังแสดงในสมการ (2.16) ทำให้ได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ซึ่งทำให้ค่า pH ของซีเมนต์เพสต์สูงขึ้นมาก (pH = 13.5) จึงเป็นการรักษาเสถียรภาพของ C-S-H และ ettringite ($C_6A\underline{S}H_{32}$) ไม่ทำให้ปฏิกิริยากลายเป็นผลิตผลอื่น โดยที่สารยิปซัม ($C\underline{S}H_2$) ที่ได้จากสมการ (2.16) จะทำปฏิกิริยากับผลผลิตไฮเดรชั่นบางตัว เช่น แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C_4AH_{13}) โมโนซัลเฟต ($C_4A\underline{S}H_{12}$) และไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำให้ได้ Secondary Ettringite อีก ดังแสดงในสมการ (2.17) ถึง (2.19) โดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลิตผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นชนิดอื่นมาก จึงทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นผลที่เกิดจากการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟตจึงเป็นการขยายตัวและการแตกร้าวของคอนกรีต

$$CH + N\underline{S} + 2H \longrightarrow C\underline{S}H_2 + NH \qquad (2.16)$$

$$C_4AH_{13} + 3C\underline{S}H_2 + 14H \longrightarrow C_6A\underline{S}H_{32} + CH \qquad (2.17)$$

$$C_4A\underline{S}H_{12} + 2C\underline{S}H_2 + 16H \longrightarrow C_6A\underline{S}H_{32} \qquad (2.18)$$

$$C_3A + 3C\underline{S}H_2 + 26H \longrightarrow C_6A\underline{S}H_{32} \qquad (2.19)$$

นิยาม โซเดียมซัลเฟต ($N\underline{S}$) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH)

สารยิปซัม ($C\underline{S}H_2$) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C_4AH_{13})

โมโนซัลเฟต ($C_4A\underline{S}H_{12}$) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

Ettringite (C_6ASH_{32}) น้ำ (H)

การทำลายโดยโซเดียมซัลเฟตนั้นขึ้นอยู่กับการเกิด Secondary Ettringite ดังสมการ (2.7) ถึง (2.9) ดังนั้นในการผลิตปูนซีเมนต์ต้านทานโซเดียมซัลเฟต จึงต้องจำกัดปริมาณ C_3A ให้น้อยกว่าร้อยละ 5 ถ้าปริมาณ C_3A มีอยู่ระหว่างร้อยละ 5 ถึง 8 การทำลายโดยซัลเฟตมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้น และถ้าปริมาณ C_3A มีมากกว่าร้อยละ 8 การทำลายน่าจะเกิดขึ้น และยังมีองค์ประกอบอีกสองประการ ที่มีอิทธิพลต่อการทำลายในลักษณะนี้คือ ปริมาณ C_4AF ซึ่งแม้ว่าจะทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลเฟตได้น้อยกว่า C_3A แต่มีกลไกการพัฒนาคล้ายกับการเกิด Ettringite แต่มีการขยายตัวน้อยกว่า ส่วนองค์ประกอบอีกประการหนึ่งคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่เป็นผลผลิตจากสมการ (2.6) ซึ่งทำให้ ettringite มีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงทำให้การขยายตัวมีมากขึ้น นอกจากนี้ยิปซัมที่ได้จากสมการ (2.6) ยังมีปริมาณมากกว่าสารตั้งต้น ดังนั้นถ้าต้องการผลิตปูนซีเมนต์ที่ต้านทานซัลเฟตต้องลดปริมาณ CH ลง พร้อมกับการจำกัดปริมาณ C_3A และ C_4AF ในการลดปริมาณ CH ทำได้โดยการลดอัตราส่วน C_3A / C_2S หรือใช้ปูนซีเมนต์ผสม

2) กลไกของการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟต

กลไกการทำลายเริ่มต้นจากปฏิกิริยาในสมการ (2.20) ถึง (2.21) จะแตกต่างจากกรณีของโซเดียมซัลเฟต กล่าวคือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MH) หรือ Brucite มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก และค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่าประมาณ 10.5 ดังนั้นจึงทำให้ CSH และ Ettringite ไม่เสถียรภาพ นอกจากนี้ CSH จะถูกทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟต ดังแสดงในสมการที่ (2.21) จากสมการที่ (2.21) ถึง (2.22) ทั้ง $C\underline{S}H_2$ และ MH จะสะสมมากขึ้นโดย $C\underline{S}H_2$ จะถูกสะสมในช่องว่างของคอนกรีต ส่วน MH จะทำปฏิกิริยากับซิลิก้าเจล (S_2H) ดังสมการ (2.22) ได้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (MSH) ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสาน ดังนั้นในการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตจึงเป็นการเปลี่ยน CSH เป็น MSH การทำลายดังกล่าวทำให้เกิดการกร่อน อ่อนตัว และเสื่อมสภาพของซีเมนต์ที่แข็งตัว และจะเกิดการสะสม CSH_2 โดยไม่เกิดการขยายตัวมากอย่างกรณีการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟต

$$CH + MS + 2H \longrightarrow CSH_2 + MH \quad (2.20)$$

$$C_xS_yH_z + xMS + (3x+0.5y-z)H \longrightarrow xCSH_2 + xMH + 0.5yS_2H \quad (2.21)$$

$$4MH + SH_n \longrightarrow M_4SH_{8.5} + (n-4.5)H \quad (2.22)$$

นิยาม แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) แมกนีเซียมซัลเฟต (M$\underline{S}$)
แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MH) แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH)
ซิลิเกตไฮเดรต (SH) แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (MSH)
สารยิปซัม ($C\underline{S}H_2$)

3) ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายโดยซัลเฟต

1) สิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟต ตลอดจนความข้นของซัลเฟต ถ้ามีความเข้มข้นของซัลเฟตสูงก็จะมีการทำลายที่รุนแรงมากขึ้น

2) ความทึบน้ำของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ยากขึ้น ทำให้ระดับความรุนแรงลดลง

3) ปริมาณ C_3AF และ C_4AF ในปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A และ C_4AF น้อยจะมีแนวโน้มที่จะต้านทานการทำลายของซัลเฟต ได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A และ C_4AF สูง และปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วน C_3A ต่อ C_2S ต่ำก็จะมีความต้านทานซัลเฟตดีขึ้น

4) ปริมาณ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีต ถ้าสามารถลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตได้ก็จะช่วยลดความรุนแรงลงได้ด้วย วิธีการลด $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตอาจทำได้โดยการใช้สารปอซโซลาน แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

4) วิธีการป้องกันการทำลายโดยซัลเฟต

วิธีการป้องกันและบรรเทาความรุนแรงของการทำลายโดยซัลเฟต อาจทำได้ดังต่อไปนี้

1) ใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A และอัตราส่วน C_3S ต่อ C_2S นั่นคือปูนซีเมนต์ชนิดที่ 5 หรือที่เรียกว่า ปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟต (Sulfate Resisting Cement)

2) การใช้สารปอซโซลานทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน ซึ่งจะช่วยลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) รวมทั้งลด C_3A และยังสามารถช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีตได้ด้วย

3) ลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ให้ต่ำเพื่อให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้น

4) ออกแบบให้คอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์เพสต์ไม่มากเกินไป ในบางกรณีการป้องกันความเสียหายจากการทำลายของซัลเฟตที่รุนแรงโดยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 5 แต่เพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอในสภาวะที่ซัลเฟตมีความเข้มข้นอยู่ในระดับรุนแรงมาก หากใช้สารปอซโซลานประกอบกันไปด้วย จะเป็นการช่วยทำให้คอนกรีตมีความต้านทานต่อการทำลายของซัลเฟตได้ดี

ยิ่งขึ้น ตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงข้อแนะนำของสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับการเลือกใช้ชนิดของวัสดุประสานและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมของซัลเฟตที่มีความรุนแรงต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 2.4 ข้อแนะนำสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติในสภาวะแวดล้อมของซัลเฟต [1]

สภาพแวดล้อมซัลเฟต	ซัลเฟตในดินที่ละลายน้ำ (so_4^{2-},ร้อยละ)	ซัลเฟตในน้ำ (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	ไม่สูงกว่า 0.50
รุนแรง	0.20-2.00	150-10,000	ประเภท 5	ไม่สูงกว่า 0.45
รุนแรงมาก	มากกว่า 2.00	มากกว่า 10,000	ประเภท 5+ สารปอซโซลาน	ไม่สูงกว่า 0.45

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปิติศานต์ กร้ำมาตร และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล (2549) ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แตกต่างกันสองระดับคือร้อยละ 8.28 และร้อยละ 17.28 จากการศึกษาพบว่าการขยายตัวเมื่อแช่ทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต รวมทั้งการลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 ให้ค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบมอร์ต้ารปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้ค่าสูงกว่า ในทางกลับกันมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 ส่งผลให้การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักแย่ลงกว่าเดิม แต่จะช่วยให้ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตทั้งสองชนิดลดลง การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 จะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น การใช้เถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่การ

ลดลงจะไม่มีผลกระทบเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 นอกจากนี้ยังพบว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ค่าการขยายตัว ค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัด และค่าการสูญเสียน้ำหนักจะเป็นสัดส่วนกัน อย่างไรก็ตามในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีเพียงค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนักที่เป็นสัดส่วนกัน แต่การขยายตัวจะมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนัก

ชรรณสิทธิ์ และคณะ (2550) ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูนผสมเถ้าลอยโดยใช้มอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ทั้งไม่แทนที่และแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน และเถ้าลอย และทั้งฝุ่นหินปูน และเถ้าลอย และทั้งฝุ่นหินปูนที่ผสมเถ้าลอยซึ่งในการใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ตลอดการทดลอง โดยวัดการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตทั้งโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 2, 3, 4, 8, 13, 20, 28, 36, 44 และ 52 สัปดาห์ และในการศึกษาพบว่าการขยายของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในขณะที่การขยายตัวของตัวมอร์ต้าร์เถ้าลอยผสมฝุ่นหินปูนที่แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้งกรณีประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน จะพบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยผสมฝุ่นหินปูนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่ากรณีของตัวอย่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยผสมฝุ่นหินปูนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สำหรับการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอย ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 5 การสูญเสียน้ำหนักมีค่ามากกว่าในมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน แต่ในขณะเมื่อแทนด้วยฝุ่นหินปูนผสมเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 กลับให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่ากรณีมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

นัทธาวุธ และคณะ (2550) ได้ศึกษาการนำถ้าลอยและฝุ่นหินปูนมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนที่ต่างกันทำเป็นตัวอย่างมอร์ต้าร์เพื่อประเมินความสามารถในการไหล กำลังอัด และการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตและคลอไรด์

จากผลการศึกษาพบว่า ค่าการไหลของมอร์ต้าร์ที่แทนที่เถ้าลอยและฝุ่นหินปูนมีค่าการไหลมากกว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนโดยเฉพาะในกรณีแทนที่เถ้าลอยอย่างเดียวจะให้ค่าการไหลที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วน กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของฝุ่นหินปูนจะให้ค่ามากกว่ากรณีปูนซีเมนต์ล้วน ในขณะกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยให้ค่าที่ต่ำกว่ากรณีปูนซีเมนต์

ล้วน โดยเฉพาะแทนที่ด้วยปริมาณที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามในกรณี 60 วันพบว่ากำลังอัดที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดปูนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วน

สำหรับการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์พบว่ามอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเมื่อใช้ส่วนผสมเถ้าลอย ร้อยละ 20 นั้นจะส่งผลให้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ยิ่งเกิดการขยายตัวที่สูงขึ้นกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วน แต่ในทางกลับกันเมื่อใช้ส่วนผสมเถ้าลอย ร้อยละ 40 พบว่า การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เกินขึ้นน้อยลงกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วน แต่มอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและแบบผสมพบว่ามอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจะมีการขยายตัวที่สูงกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วน ในการแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยฝุ่นหินปูน การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ก็จะมีแนวโน้มที่จะขยายตัวเพิ่มขึ้นบ้างแต่ก็มีค่าที่น้อยกว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน การเปรียบเทียบกันระหว่างมอร์ต้าร์ในสภาวะที่มีซัลเฟต กับมอร์ต้าร์ในสภาวะที่มีซัลเฟตและคลอไรด์ พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ ในสภาวะที่มีซัลเฟตจะมีการขยายตัวสูงกว่า

ณัฐวุฒิ และคณะ (2550) ได้ศึกษาการนำเอาฝุ่นหินปูนมาแทนที่บางส่วนในปูนซีมนต์ (ร้อยละ 0, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก) ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.4 และ 0.55 จากการศึกษาพบว่า ความละเอียดของฝุ่นหินปูนมีผลต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์โดยเฉพาะกรณีฝุ่นหินปูนความละเอียด 3 ไมครอนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภท 5 เมื่อใช้ W/B เท่ากับ 0.4 จะมีการขยายตัวน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แทนที่ในขณะที่ฝุ่นหินปูนความละเอียด 3 และ 13 ไมครอน จะมีการขยายตัวน้อยกว่า เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภท 5 ล้วน นอกจากนี้พบว่ามอร์ต้าร์ เมื่อแทนที่ฝุ่นหินปูนทั้งขนาด 3 และ 13 ไมโครเมตร ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมีการขยายตัวน้อยกว่าเมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในส่วนของการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างพบว่าในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตตัวอย่างที่แทนที่ฝุ่นหินปูนจะมีแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่ากรณีไม่แทนที่ โดยเฉพาะเมื่อความละเอียดที่มากขึ้นจะให้การสูญเสียน้ำหนักที่ต่ำลง

นายธงฉาน อ่อนโอน และ นายนคร วงศ์สว่างทรัพย์ (2554) ศึกษาสมบัติกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมของคอนกรีตบดอัดที่มีกากยิปซัมและเถ้าลอยเป็นสารผสมเพิ่ม โดยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของก้อนคอนกรีตบดอัดที่มี เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 และกากยิปซัม ผสมอยู่ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 12 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ซึ่งศึกษาคุณสมบัติการดูดซึมน้ำและกำลังรับแรงอัด ได้แบ่งตัวอย่างการทดสอบออกเป็น 3 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 14 วัน แช่น้ำ กลุ่มที่2 ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน แช่น้ำ และกลุ่มที่ 3 อายุการบ่มที่ 14 วัน แช่

น้ำ-อบแห้ง 5 รอบ ทดสอบการดูดซึมน้ำแล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน จากการทดสอบผลการทดสอบในเรื่องการกำลังรับแรงอัดมีปัญหาในด้านการเตรียมตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้จึงมีความแปรปรวนสูง ดังนั้นการทดสอบในการรับแรงอัดนี้จึงได้ข้อสรุปเป็นแนวโน้มเท่านั้น โดยไม่ได้ตัดข้อมูลทิ้งเนื่องจากจำนวนข้อมูลในแต่ละตัวอย่างมีน้อย ซึ่งคอนกรีตบดอัดที่ แช่น้ำ-อบแห้ง 5 รอบ ที่อายุ 28 วัน มีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตบดอัดที่ แช่น้ำและข้อมูลส่วนใหญ่ที่ได้จากการทดสอบการกำลังรับแรงอัดจึงไม่สามารถนำไปใช้ได้ ส่วนข้อมูลในด้านการดูดซึมน้ำนั้นได้ผลการทดลองที่ชัดเจนคือ เมื่อใช้ปริมาณยิปซัมในส่วนผสมที่มากขึ้น จะทำให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มที่ลดลง โดยเมื่อใช้ปริมาณยิปซัม12เปอร์เซ็นต์ จะให้ค่าการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดคือร้อยละ 7.59 โดยค่ากำลังรับแรงอัดไม่เปลี่ยนแปลงมากหนักมากนัก ซึ่งการดูดซึมน้ำจะลดลงร้อยละ 6.7 เมื่อเทียบกับกรณีไม่ใส่ยิปซัมเลย

กิตติพัทธ์ และคณะ (2556) ได้ศึกษาการนำตะกรันเตาถลุงเหล็กและฝุ่นหินปูนแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ จากการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กและฝุ่นหินปูน มีแนวโน้มมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยเฉพาะเมื่อปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กมีมากขึ้น การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กและฝุ่นหินปูน มีแนวโน้มนานกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สำหรับค่ากำลังอัดประลัยของซีเมนต์เพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กและฝุ่นหินปูน จะมีค่าน้อยกว่าในช่วงต้นแต่มีแนวโน้มมากกว่าเมื่ออายุเพิ่มขึ้น

ยุงยุทธ วัฒนกุลและคณะ (2553) ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ (ทั้งประเภทที่ 1 และ5) ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่ากรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ในขณะที่การก่อตัวของเพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างกับกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน สำหรับค่าการยุบตัวของคอนกรีตนั้น มีแนวโน้มที่จะผกผันกับค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ และนอกจากนี้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยจะมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนส่วนกรณีแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนจะให้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตไม่แตกต่างกับกรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน สำหรับการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มีแนวโน้มมากกว่ากรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการขยายตัวของคอนกรีตเถ้าลอย และคอนกรีตผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างจากกรณีปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน สำหรับการใช้วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน) พบว่า การขยายตัวของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงในปริมาณต่ำจะทำให้ค่าการขยายตัวของคอนกรีตมากขึ้น แต่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูงๆ จะให้ค่าการขยายตัวน้อยลง

J.Khunthongkeaw ,S.Tangtermsirikul and T.Leelawat ได้ทำการศึกษาเรื่อง A Study on Carbonation Depth Prediction For Fly Ash Concrete มีการใช้เถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของปริมาณ C_aO ที่ต่างกันสำหรับการหล่อคอนกรีตทดสอบ โดยนำตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยไปทดสอบในสภาวะเร่งและในสภาวะแวดล้อมจริงต่างๆ คือ ในเขตเมือง ชนบท และชายทะเล พบว่า คอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ C_aO สูงจะมีการเกิดคาร์บอเนชั่นต่ำกว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ C_aO ต่ำ ส่วนการเกิดคาร์บอเนชั่นของสภาวะแวดล้อมในเมืองสูงกว่าสภาวะแวดล้อมอื่นๆนอกจากนี้ พบว่า การแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ก็ทำให้เกิดคาร์บอเนชั่นได้เร็วกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าลอย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทที่ 3
วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาเป็นการกล่าวถึง กลไกการทำลายคอนกรีตโดยซัลเฟต ขั้นตอนวิธีการประเมินการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต ผลกระทบที่มีต่อการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต และการพิจารณาวิเคราะห์เลือกใช้คอนกรีตให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมซัลเฟตโดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 กลไกการทำลายคอนกรีตโดยซัลเฟต

ปัจจุบันการศึกษาความเสียหายเนื่องจากผลกระทบของซัลเฟตต่อคอนกรีตนับว่ามีความจำเป็นยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องก่อสร้างอาคารในบริเวณหรือที่ใกล้กับทะเลเช่น ตอม่อ ท่าเรือ ประภาคาร เขื่อน ฯลฯ เนื่องจากซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำทะเล ซัลเฟตอาจเกิดจากสารอินทรีย์ที่ผุเน่าซึ่งก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อก๊าซนี้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศจะกลายเป็นกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟูริค (H_2SO_4) และแปรสภาพเป็นซัลเฟตในที่สุด อำนาจการทำลายของซัลเฟตต่อคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟตและความชื้น การทำลายของซัลเฟตไม่แสดงออกเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่มีอำนาจรุนแรงเมื่อคอนกรีตเปียกชื้นและรุนแรงมากในกรณีที่เปียกและแห้งสลับกัน เช่น ในท่อระบายน้ำโสโครก ในอาคารส่งน้ำเพื่อชลประทาน ฐานรากและพื้นอาคารในดินที่มีซัลเฟต

สารละลายซัลเฟตในน้ำทะเลที่กัดกร่อนคอนกรีตโดยตรง และรุนแรง คือแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ส่วนเกลือแกง (NaCl) กับโปตัสเซียมคลอไรด์ (KCl) ซึ่งมักพบมากในน้ำทะเลเช่นกันจะทำให้คลอไรด์ซึมผ่านเข้าเนื้อคอนกรีตเป็นผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิมได้ง่ายในน้ำใต้ดินบริเวณที่มีแคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม ($CaSO_4.2H_2O$) มักมีซัลเฟตปนอยู่เสมอ โดยทั่วไปดินมีซัลเฟตอยู่เล็กน้อย คือประมาณร้อยละ 0.01 ถึง 0.05 ของน้ำหนัก แต่จะเพิ่มสูงมากขึ้นเนื่องจากการใช้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยธรรมชาติ

การศึกษาการกัดกร่อนของซัลเฟตต่อคอนกรีตเป็นสิ่งที่น่าสนใจและจำเป็นอย่างมาก เพราะถ้าไม่ป้องกันผลกระทบของการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตในตอนเริ่มแรกของการก่อสร้างแล้วคอนกรีตอาจเสียหายได้ในอนาคตอันใกล้ ทำให้ต้องซ่อมแซมคอนกรีตและการซ่อมแซมคอนกรีตที่เสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของซัลเฟตจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก

เกลือซัลเฟตที่อยู่ในรูปของสารละลายสามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ โดยธรรมชาติของซัลเฟตแต่ละชนิดมีความสามารถละลายน้ำได้ไม่เท่ากัน (คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค, 2536)

กล่าวคือ แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ละลายน้ำเพียง 1.2 กรัม/ลิตร ส่วนโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ละลายน้ำ 240 กรัม/ลิตร และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ละลายน้ำ 300 กรัม/ลิตร เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) มีความสามารถละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นในการศึกษาความทนทานต่อซัลเฟตจึงใช้สารโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) กลไกการกัดกร่อนของซัลเฟตอิออนทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทำให้เกิดการขยายตัวในคอนกรีตที่แข็งตัวจนกระทั่งเกิดการแตกร้าว โดยสภาวะของซัลเฟตสามารถแบ่งตามสภาพแวดล้อมซัลเฟต

3.2 ขั้นตอนวิธีการประเมินการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

สำหรับวิธีการประเมินการต้านทานซัลเฟตนั้น ในที่นี้จะเลือกการประเมินการต้านซัลเฟต ใน 3 ลักษณะ คือ 1) การขยายตัว 2) การสูญเสียน้ำหนัก และ 3) การลดลงกำลังอัด ของตัวอย่างมอร์ต้าร์/คอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การวัดการขยายตัว

วิธีการวัดการขยายตัวของชิ้นมอร์ต้าร์/คอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟตกระทำตามมาตรฐาน ASTM C1012 โดยตัวอย่างมอร์ต้าร์ใช้ตัวอย่างขนาด 25x25x185 มิลลิเมตร ในขณะที่ตัวอย่างคอนกรีต ใช้ตัวอย่างขนาด 75x75x185 มิลลิเมตร โดยหลังจากแช่ชิ้นตัวอย่างในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน ทำการวัดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดความยาว (Length Comparator) ตามมาตรฐาน ASTM C490 ต่อจากนั้นนำตัวอย่างแช่ในสารละลายซัลเฟต แล้วทำการวัดความยาวของชิ้นตัวอย่างที่อายุ 2, 3, 4 และ 6 สัปดาห์ของการแช่ในสารละลายซัลเฟต หลังจากนั้นให้ทำการวัดตัวอย่างทุกๆ 2 เดือนของการแช่ในสารละลายซัลเฟต สำหรับการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างเป็นการเฉลี่ยการขยายตัว 3 ชิ้นตัวอย่าง สำหรับค่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์/คอนกรีต คำนวณจากสมการ (3.1)

$$\text{การขยายตัว (\%)} = [\,(L_2-L_1)/L_1\,] \times 100 \qquad (3.1)$$

โดยที่ L_1 คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่างหลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน

L_2 คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของชิ้นตัวอย่าง ณ เวลาที่ต้องการวัดการขยายตัวหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตแล้ว

2) การวัดการสูญเสียน้ำหนัก

ในการวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างในสารละลายซัลเฟตนั้น โดยตัวอย่างมอร์ต้าร์ใช้ตัวอย่างขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ในขณะที่ตัวอย่างคอนกรีต ใช้ตัวอย่างขนาด 100x100x100 มิลลิเมตร หรือ 150x150x150 มิลลิเมตร แช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วันแล้ว ทำการวัดน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง ต่อจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างแช่ในสารละลายซัลเฟต แล้วทำการวัดการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างที่อายุ 2, 3, 4 และ 6 สัปดาห์ของการแช่ในสารละลายซัลเฟต หลังจากนั้นให้ทำการวัดตัวอย่างทุกๆ 2 เดือนของการแช่ในสารละลายซัลเฟต การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคำนวณจากค่าเฉลี่ยของการสูญเสียน้ำหนักของ 3 ชิ้นตัวอย่าง สำหรับการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์คำนวณจากสมการ (3.2)

$$\text{การสูญเสียน้ำหนัก (\%)} = [\ (W_1-W_2)/\ W_1\ ] \times 100 \qquad (3.2)$$

โดยที่ W_1 คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างหลังแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน

W_2 คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่าง ณ เวลาที่ต้องการวัดการวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตแล้ว

3) การวัดการลดลงกำลังอัด

การวัดการลดลงกำลังอัด กระทำตามมาตรฐาน BS1881 [23] ทดสอบด้วยเครื่อง Compression Testing Machine ดังรูปที่ 3.1

ในการวัดการลดลงกำลังอัดของตัวอย่างในสารละลายซัลเฟตนั้น โดยตัวอย่างมอร์ต้าร์ใช้ตัวอย่างขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ในขณะที่ตัวอย่างคอนกรีต ใช้ตัวอย่างขนาด 100x100x100 มิลลิเมตร หรือ 150x150x150 มิลลิเมตร หลังถอดแบบ นำไปบ่มในน้ำ และสารละลายซัลเฟต ทำการการลดลงกำลังอัดของที่อายุ 28 56 และ 84 วัน ในการทดสอบจะนำคอนกรีตวางในแนวนอนในเครื่องทดสอบ Compression Testing Machine แล้วกดด้วยแรงสม่ำเสมอจนกระทั่งแท่งคอนกรีตแยกออกจากกัน สำหรับการวัดการลดลงของกำลังอัดคำนวณจากสมการ (3.3)

การวัดการลดลงของกำลังอัด

$$\text{การลดลงของกำลังอัด (\%)} = [(Sw - Ss)/Sw] \times 100 \qquad (3.3)$$

โดยที่ Sw คือค่าเฉลี่ยกำลังอัดของตัวอย่างที่แช่ในน้ำ

Ss คือค่าเฉลี่ยกำลังอัดของตัวอย่างหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟต

รูปที่ 3.1 เครื่อง Compression Testing Machine

รูปที่ 3.2 แท่งตัวอย่างคอนกรีตในแบบหล่อ ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร

3.3 ผลกระทบที่มีต่อการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

จากปัญหาที่กล่าวมาจะเห็นว่าการทำลายซัลเฟตต่อคอนกรีตมีหลายปัจจัย ขึ้นกับหลายๆ ปัญหา ดังนั้นในการศึกษาในครั้งนี้ จะศึกษาถึงผลกระทบดังนี้

3.3.1 ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

โดยจะพิจารณาถึงชนิดของวัดสุประสาน รวมทั้งปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนปอร์แลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย ผงหินปูน ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม สำหรับการศึกษาผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน ได้ใช้การวิจัยที่ผ่านเพื่อการศึกษา วิเคราะห์ และประเมิน ซึ่งประกอบไปด้วย

- เรื่องการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ โดย อภิชา หนูพันธ์
- เรื่องคุณสมบัติด้านซีเมนต์และความต้านทาน ซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และ ผงหินปูน โดย ยงยุทธ วัฒนกุล
- เรื่องความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดย นรากร สุดทำนอง

- เรื่องผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ โดย นพคุณ ผลโพธิ์
- เรื่องความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายซัลเฟต โดย สุรพงศ์ หมวกนาค
- เรื่องการขยายตัวของมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในสารละลายซัลเฟต โดย ชัยณรงค์ เรื่องเลือ
- เรื่องผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ โดย ปรีดา พันธุ์พงศ์
- เรื่องสมบัติเบื้องต้นและการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก โดย เอกราช จำนงค์รัตน์

3.3.2 ผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟต

โดยจะพิจารณาถึงสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟล สารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟล แคลเซียมซัลเฟต และคลอไรด์ซัลเฟต สำหรับการศึกษาผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟต ได้ใช้การวิจัยที่ผ่านเพื่อการศึกษา วิเคราะห์ และประเมิน ซึ่งประกอบไปด้วย

- เรื่องความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายซัลเฟต โดย สุรพงศ์ หมวกนาค
- เรื่องคุณสมบัติด้านซีเมนต์และความต้านทาน ซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และ ผงหินปูน โดย ยงยุทธ วัฒนกุล
- เรื่องผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ โดย นพคุณ ผลโพธิ์

3.3.3 ผลกระทบจากความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต

ในส่วนความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตนั้น ความเข้มข้นที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์/คอนกรีต ประกอบด้วย ความเข้มข้นที่ร้อยละ (โดยน้ำหนัก) คือร้อยละ 1 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก หรือมีปริมาณอิออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 6760, 33800, 67600, 101400 และ 135200 ppm ตามลำดับ โดยดำเนินการเตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมวัลเฟต แสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ ได้ใช้การวิจัยที่ผ่านเพื่อการศึกษา วิเคราะห์ และประเมิน ซึ่งประกอบไปด้วย

- เรื่องผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ โดย ปรีดา พันธุ์พงศ์

3.3.3 ผลกระทบจากความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต

ในส่วนความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตนั้น ความเข้มข้นที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์/คอนกรีต ประกอบด้วย ความเข้มข้นที่ร้อยละ (โดยน้ำหนัก) คือร้อยละ 1 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก หรือมีปริมาณอิออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 6760, 33800, 67600, 101400 และ 135200 ppm ตามลำดับ โดยดำเนินการเตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมวัลเฟต แสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 การเตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ความเข้มข้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	สารละลายโซเดียมซัลเฟต (กรัม)	สารละลาย (ลิตร)
1	10	1
5	50	1
10	100	1
15	150	1
20	200	1

ตารางที่ 3.2 การเตรียมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ความเข้มข้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (กรัม)	สารละลาย (ลิตร)
1	8.47	1
5	42.36	1
10	84.72	1
15	127.08	1
20	169.44	1

3.3.4 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ใช้ศึกษาในการพิจารณาสำหรับการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์/คอนกรีต เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในอัตราส่วนต่างๆ เช่น 0.40 0.55 0.65 เป็นต้น ได้ใช้การวิจัยที่ผ่านเพื่อการศึกษา วิเคราะห์ และประเมิน ซึ่งประกอบไปด้วย

- เรื่องการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน โดย สุขชัย สุขยานุดิษฐ์

3.3.5 ผลกระทบจากสภาวะเปียกสลับแห้ง

ในส่วนการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตในสภาวะเปียกสลับแห้งนั้น โดยการนำตัวอย่างมอร์ต้าร์/คอนกรีต โดยใช้การหมุนเวียนของเปียกสลับแห้ง โดยรูปที่ 3.3 แสดงระบบการหมุนเวียนสารละลาย ในสภาวะเปียกสลับแห้ง

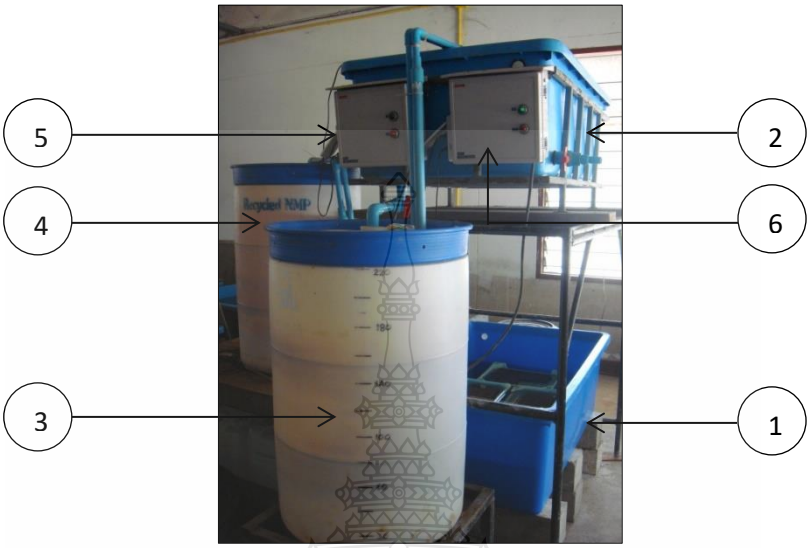
ได้ใช้การวิจัยที่ผ่านเพื่อการศึกษา วิเคราะห์ และประเมิน ซึ่งประกอบไปด้วย

- เรื่องการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักและการขยายตัวของมอร์ต้าร์ใสารละลายซัลเฟตภายใต้สภาวะเปียกตลอดเวลาและเปียกสลับแห้ง โดย กิตติศักดิ์ ล้วนวานิช

รูปที่ 3.3 ระบบการหมุนเวียนสารละลาย ในสภาวะเปียกสลับแห้ง

ส่วนประกอบของระบบการหมุนเวียนสารละลายซัลเฟต ในสภาวะเปียกสลับแห้ง

รูปที่ 3.4 แสดงรายละเอียดระบบการหมุนเวียนของสารละลายซัลเฟตในสภาวะปียกสลับแห้ง



รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของระบบการหมุนเวียนสารละลาย ในสภาวะเปียกสลับแห้ง

รูปที่ 3.5 ปั้มสูบน้ำหมุนเวียนสารละลาย

ความหมายของสัญลักษณ์ที่แสดงตามรูปที่ 3.4

หมายเลข 1 ถังแช่ตัวอย่างในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

หมายเลข 2 ถังแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

หมายเลข 3 ถังเก็บสารละลายโซเดียมซัลเฟต

หมายเลข 4 ถังเก็บสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

หมายเลข 5 เครื่องตั้งเวลาเปิดปิดโดยอัตโนมัติที่ใช้ดูดน้ำลง

หมายเลข 6 เครื่องตั้งเวลาเปิดปิดโดยอัตโนมัติที่ใช้ดูดน้ำขึ้น

หมายเลข 7 ปั้มสูบน้ำหมุนเวียนสารละลาย

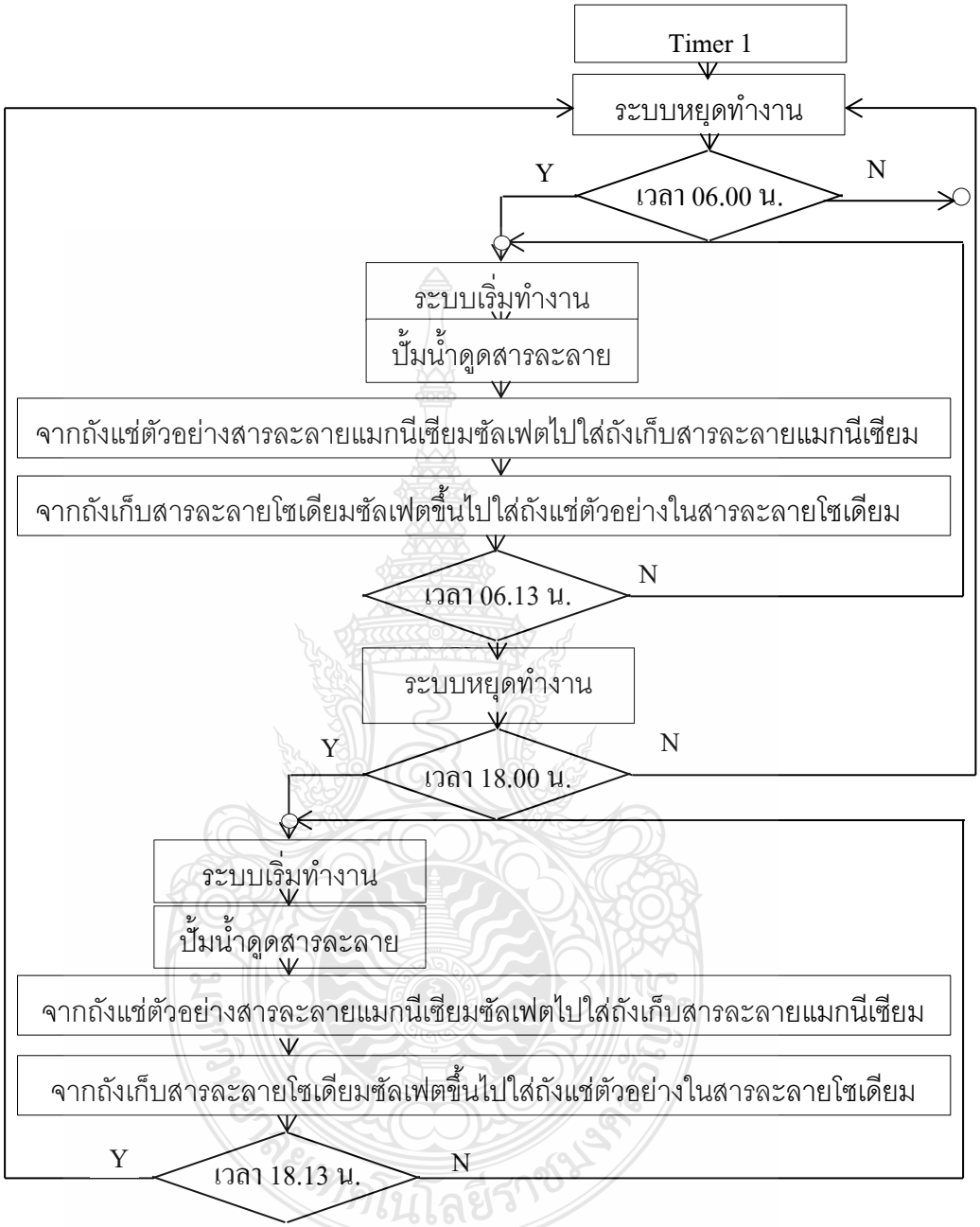
<u>ขั้นตอนการทำงานของระบบการหมุนเวียนสารละลาย</u>

1) เวลา 06.00 นาฬิกา เครื่องตั้งเวลาเปิดปิดอัตโนมัติ (Timer) ส่งจ่ายกระแสไฟเข้าระบบให้ปั้มน้ำทั้งสองตัวดูดสารละลายขึ้นจากถังแช่ตัวอย่างสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ไปใส่ถังเก็บสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ทำให้สารละลายท่วมตัวอย่างที่วางอยู่ชั้นล่างเท่านั้น ซึ่งตัวอย่างที่วางอยู่บนจะเกิดสภาวะแห้ง ตัวอย่างตะแกรงล่างจะอยู่ในสภาวะเปียกตลอดเวลา ในขณะเดียวกันปั้มน้ำอีกตัวก็ดูดสารละลายขึ้นจากถังเก็บสารละลายโซเดียมซัลเฟตขึ้นไปใส่ถังแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ทำให้สารละลายท่วมตัวอย่างซึ่งเป็นสภาวะเปียกตลอดเวลาทั้งตะแกรงบนและล่าง จนถึงเวลา 06.13 นาฬิกา ปั้มน้ำจึงจะหยุดทำงานตามเวลาที่ตั้งไว้

2) เวลา 12.00 นาฬิกา เครื่องตั้งเวลาเปิดปิดอัตโนมัติ เริ่มทำงานส่งจ่ายกระแสไฟเข้าระบบให้ปั้มน้ำทั้งสองตัวดูดสารละลายลง จากถังเก็บสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ไปใส่ถังแช่ตัวอย่างในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ทำให้สารละลายท่วมตัวอย่างซึ่งเป็นสภาวะเปียกตลอดเวลาทั้งตะแกรงบนและล่าง ในขณะเดียวกันปั้มน้ำอีกตัวก็ดูดสารละลายลงจากถังแช่ก้อนตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ใส่ถังเก็บสารละลายโซเดียมซัลเฟตทำให้สารละลายท่วมตัวอย่างที่วางอยู่ชั้นล่างเท่านั้น ซึ่งตัวอย่างที่วางอยู่บนจะเกิดสภาวะแห้ง ส่วนตัวอย่างตะแกรงล่างจะอยู่ในสภาวะเปียกตลอดเวลา จนถึงเวลา 12.13 นาฬิกา ปั้มน้ำจึงจะหยุดทำงานตามเวลาที่ตั้งไว้

3) เมื่อถึงเวลา 18.00 นาฬิกา ระบบจะทำงานเหมือนข้อ 1) และเมื่อถึงเวลา 24.00 นาฬิกา ระบบจะทำงานเหมือนข้อ 2)

ผังแสดงระบบการหมุนเวียนสารละลาย



รูปที่ 3.6 ผังแสดงระบบการหมุนเวียนสารละลายของเครื่องตั้งเวลาเปิดปิดอัตโนมัติ

3.4 การพิจารณาวิเคราะห์เลือกใช้คอนกรีตให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมซัลเฟต

ในการศึกษาคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับสิ่งแวดล้อมซัลเฟตในครั้งนี้นั้น โดยเป็นการศึกษากลไกการทำลายคอนกรีตโดยซัลเฟต ขั้นตอนวิธีการประเมินการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต และผลกระทบที่มีต่อการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต รวมทั้งการพิจารณาเลือกใช้คอนกรีตที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟตนั้น จะเป็นการวิเคราะห์วิธีการและขั้นตอนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาถึงคอนกรีตที่สัมผัสกับสารละลายซัลเฟต รวมทั้งการพิจารณาถึงส่วนผสมของคอนกรีตโดยเฉพาะในส่วนวัสดุประสานที่ใช้ในคอนกรีตดังกล่าว เพื่อนำไปสู่การเลือกใช้คอนกรีตให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมซัลเฟตที่คอนกรีตต้องเผชิญต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิเคราะห์

จากการศึกษาการพัฒนาคอนกรีตที่เหมาะสมกับคอนกรีตที่สัมผัสสิ่งแวดล้อมซัลเฟต โดยศึกษาในส่วนของ กลไกการทำลายคอนกรีตโดยซัลเฟต ขั้นตอนวิธีการประเมินการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต ผลกระทบที่มีต่อการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต และการพิจารณาวิเคราะห์เลือกใช้คอนกรีตให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมซัลเฟต มีผลจากการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

4.1 กลไกการทำลายคอนกรีตโดยสารละลายซัลเฟต

ในการศึกษาเรื่องการทำลายโดยซัลเฟต สามารถทำได้โดยการนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ หรือคอนกรีตไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต หรือสารละลายแคลเซียมซัลเฟต แต่เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นจึงใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

1) กลไกการทำลายโดยสารละลายโซเดียมซัลเฟต [1]

กลไกนี้เริ่มต้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายโซเดียมซัลเฟต ($N\underline{S}$) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นดังแสดงในสมการ (4.1) ทำให้ได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ซึ่งทำให้ค่า pH ของซีเมนต์เพสต์สูงขึ้นเป็น 13.5 ซึ่งมากกว่าค่า pH ของสารละลาย CH อิ่มตัว ที่มีค่าเพียง 12.4 ดังนั้นจึงเป็นการรักษาเสถียรภาพของ C-S-H และ Ettringite ($C_6A\underline{S}H_{32}$) ไม่ให้ทำปฏิกิริยากลายไปเป็นผลิตผลอื่น สารยิปซั่ม ($C\underline{S}H_2$) ที่ได้จากสมการ (4.1) จะทำปฏิกิริยากับผลผลิตไฮเดรชั่นบางตัว เช่น แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C_4AH_{13}) โมโนซัลเฟต ($C_4A\underline{S}H_{12}$) และ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทำให้ได้ Secondary Ettringite อีก ดังแสดงในสมการ (4.2) ถึง (4.4) เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลิตผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นชนิดอื่นมาก จึงทำให้เกิดการขยายตัวดังนั้น ผลที่เกิดจากการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟตจึงเป็นการขยายตัวและการแตกร้าวของคอนกรีต

$$CH + N\underline{S} + 2H \longrightarrow C\underline{S}H_2 + NH \quad (4.1)$$

$$C_4AH_{13} + 3C\underline{S}H_2 + 14H \longrightarrow C_6A\underline{S}H_{32} + CH \quad (4.2)$$

$$C_4A\underline{S}H_{12} + 2C\underline{S}H_2 + 16H \longrightarrow C_6A\underline{S}H_{32} \quad (4.3)$$

$$C_3A + 3C\underline{S}H_2 + 26H \longrightarrow C_6A\underline{S}H_{32} \quad (4.4)$$

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

กล่าวโดยสรุป การทำลายโดยสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น ขึ้นอยู่กับการเกิด Secondary Ettringite ดัง แสดงในสมการ (4.2) ถึง (4.4) สารตั้งต้น ในสมการดังกล่าวมีองค์ประกอบของอลูมิเนตดังนั้น ในการผลิตปูนซีเมนต์ต้านทานโซเดียมซัลเฟต จึงมีเหตุผลที่ต้องจำกัดปริมาณ C_3A ให้น้อยกว่าร้อยละ 5 ถ้าปริมาณ C_3A มีอยู่ระหว่างร้อยละ 5 ถึง 8 การทำลายโดยสารละลายซัลเฟตมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้น และถ้าปริมาณ C_3A มีมากกว่าร้อยละ 8 การทำลายน่าจะเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบอีกสองประการ ที่มีอิทธิพลต่อการทำลายในลักษณะนี้คือ ปริมาณ C_4AF ซึ่งแม้ว่า จะทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลเฟตได้น้อยกว่า C_3A แต่มีกลไกการพัฒนาคล้ายกับการเกิด Ettringite แต่มีการขยายตัวน้อยกว่าส่วนองค์ประกอบอีกประการหนึ่งคือ NH ที่เป็นผลผลิตจากสมการ (4.1) ซึ่งทำให้ Ettringite มีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงทำให้การขยายตัวมีมากขึ้น นอกจากนี้ยิปซั่มที่ได้จากสมการ (4.1) ยังมีปริมาตรมากกว่าสารตั้งต้น ดังนั้นถ้าต้องการผลิตปูนซีเมนต์ที่ต้านทานซัลเฟตต้องลดปริมาณ CH ลง พร้อมๆกับการจำกัดปริมาณ C_3A และ C_4AF ในการลดปริมาณ CH ทำได้โดยการลดอัตราส่วน C_3S และ C_2S ลง หรือใช้ปูนซีเมนต์ผสม

รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลารโซเดียมซัลเฟต เป็นระยะเวลา 392 วัน ซึ่งจากกลไกการทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น จะเป็นการเกิด ettringite ซึ่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต มีการขยายตัวและแตกร้าวในที่สุด

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 392 วัน

2) กลไกการทำลายโดยสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต [2]

กลไกการทำลายเริ่มต้นจากปฏิกิริยาในสมการ (4.5) อย่างไรก็ตาม MH ที่เกิดขึ้นนี้ไม่เหมือนกับ NH ตรงที่มีความสามารถในการละลายน้ำที่น้อยมาก และค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่า 10.5 ดังนั้นจึงทำให้ทั้ง C-S-H และ Ettringite ไม่มีเสถียรภาพ

$$CH + MS + 2H \longrightarrow C\underline{S}H + MH \quad (4.5)$$

$$C_xS_yH_z + xMS + (3x+0.5y-z)\,H \longrightarrow xC\underline{S}H_2 + xMH + 0.5yS_2H \quad (4.6)$$

$$4MH + SH_n \longrightarrow M_4SH_{8.5} + (n-4.5)H \quad (4.7)$$

ผลกระทบจากการที่มีค่า pH ต่ำมีดังนี้

1) Secondary Ettringite จะไม่เกิดขึ้น

2) M$\underline{S}$ จะทำปฏิกิริยากับ C-S-H ดังแสดงในสมการ (4.6) ได้ยิปซั่ม (CSH_2) Brucite (MH) และ Silica Gel (S_2H) ซึ่ง Gel นี้จะมีความสามารถในการประสานได้น้อยกว่าของ C-S-H

3) C-S-H มีแนวโน้มแตกตัวให้ Lime ทำให้ค่า pH สูงขึ้น โดย Lime นี้จะไปทำปฏิกิริยากับ MS ทำให้ได้ MH มากขึ้น ดังแสดงในสมการ (4.5)

4) ความเข้มข้นของยิปซั่ม และ Brucite ในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งมีมากขึ้น ในขณะที่ C-S-H ยังสูญเสีย Lime ต่อเนื่อง และมีความสามารถในการประสานน้อยลง

5) การลดลงของ MH นั้นมาจากการที่ MH ทำปฏิกิริยากับ S_2H ดังแสดงในสมการ (4.7) ได้ M-S-H ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสานเลย

ดังนั้นกลไกในการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตจะเริ่มต้น จากสมการ (4.6) ถึง (4.7) โดยการเปลี่ยน C-S-H เป็น M-S-H ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสานเลย การทำลายดังกล่าวจะทำให้เกิดการอ่อนตัว และเสื่อมสภาพของผิว ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว และเกิดการสะสมของยิปซั่มและ Brucite อย่างไรก็ดีในที่สุด Brucite จะถูกเปลี่ยนไปเป็น M-S-H ดังแสดงในสมการ (4.7) โดยที่ไม่เกิดการขยายตัวมากอย่างกรณีการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟต

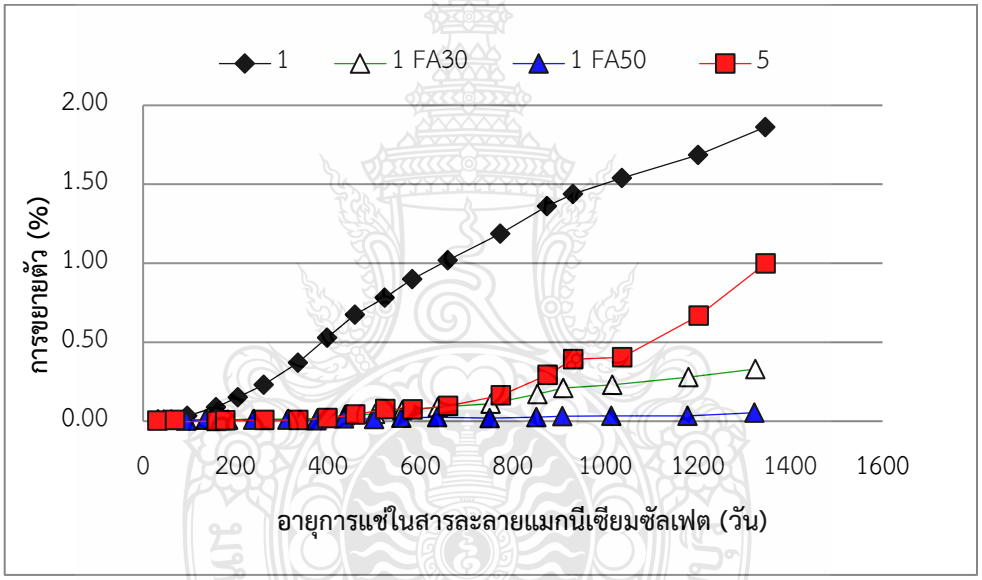
รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีซียมซัลเฟต เป็นระยะเวลา 392 วัน ซึ่งจากกลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น จะเป็นการเปลี่ยน CSH เป็น MSH ซึ่งไม่มีสมบัติในการยึดประสาน จึงมีผลทำให้ตัวอย่างมอร์ต้าร์มีสภาพยุ่ยสภาพเสื่อมของผิว

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 392 วัน

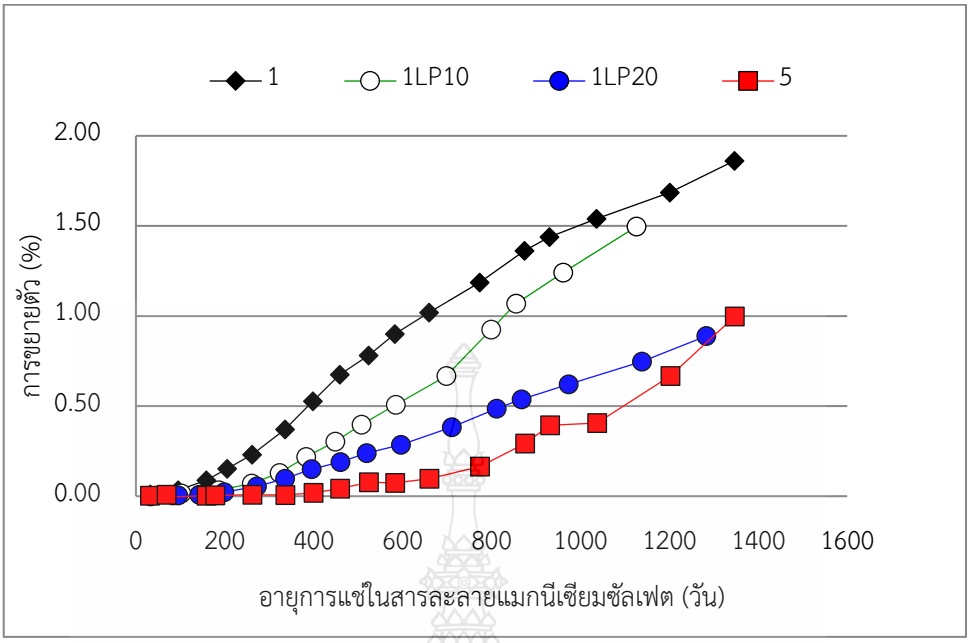
4.2 ขั้นตอนวิธีการประเมินการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

4.2.1 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์/คอนกรีตในสารละลายซัลเฟต

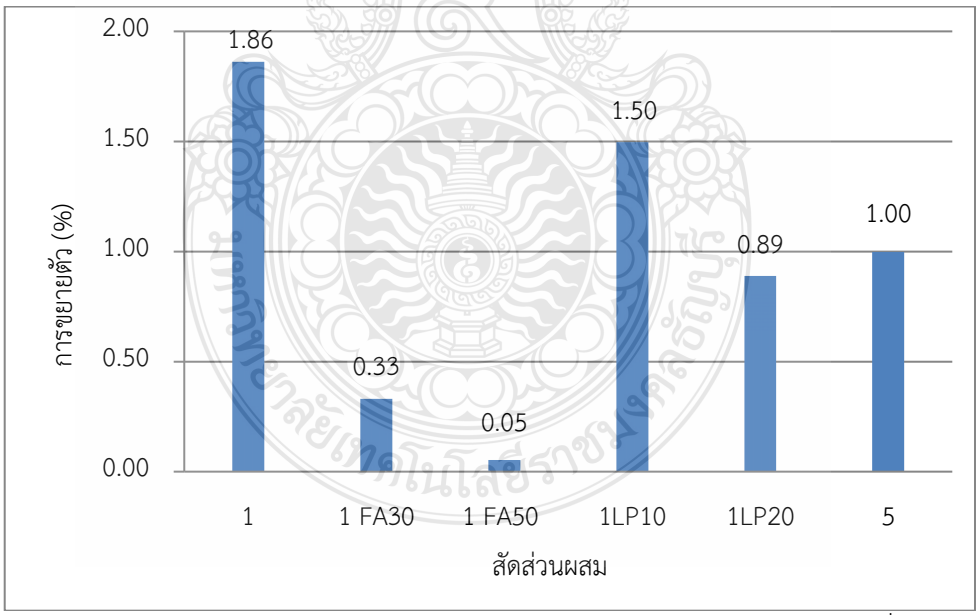
การประเมินความสามารถในการต้านทานซัลเฟตในโดยจะพิจารณาถึงการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟต โดยตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการประเมินค่าการขยายตัวประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และผงหินปูน และเถ้าลอย [7] โดยได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.5 ซึ่งจากความสัมพันธ์ของการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตกับอายุของตัวอย่างมอร์ต้าร์ หรือการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อายุใดๆ (รูปที่ 4.5) สามารถวัดความแตกต่างของการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ได้ชัดเจน กล่าวคือ สามารถที่จะประเมินการทำลายเนื่องจากสารละลายซัลเฟต ของคอนกรีตที่ต่างกันได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย (สุรพงษ์ และคณะ)



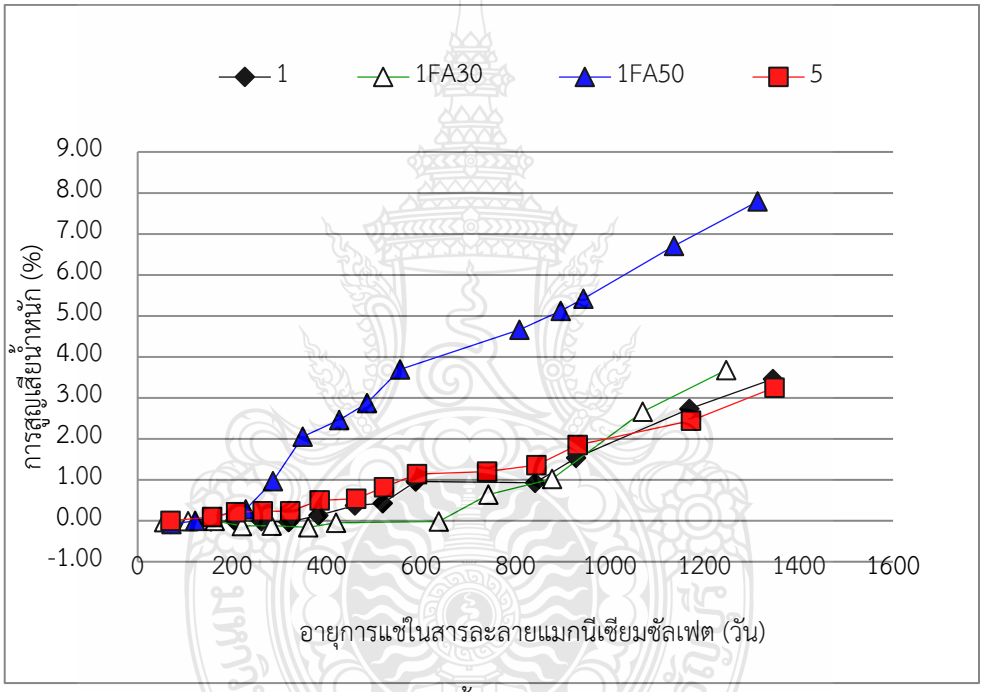
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน (สุรพงษ์ และคณะ)



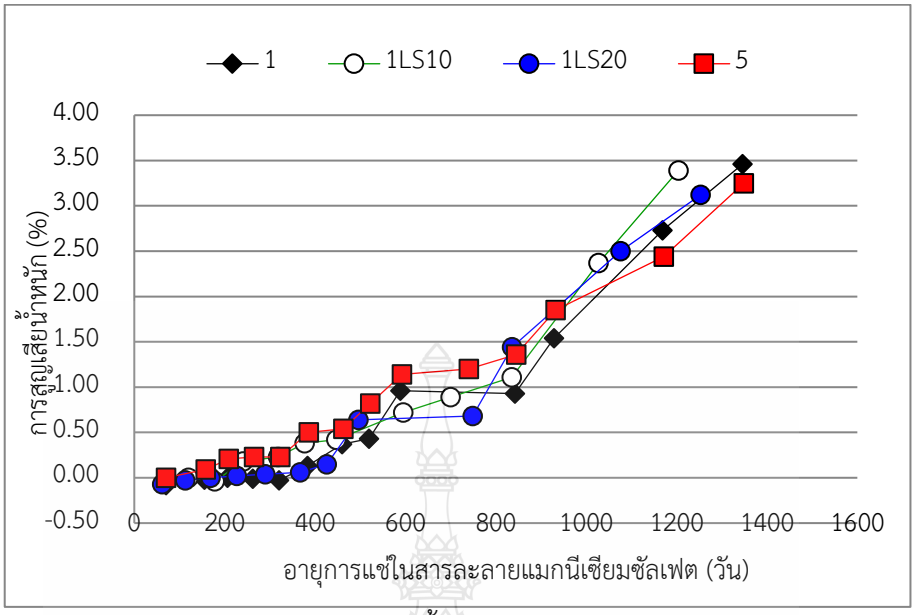
รูปที่ 4.5 การขยายตัวของตัวอย่างของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุประมาณ 1,400 วัน (สุรพงษ์ และคณะ)

4.2.2 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์/คอนกรีตในสารละลายลเฟต

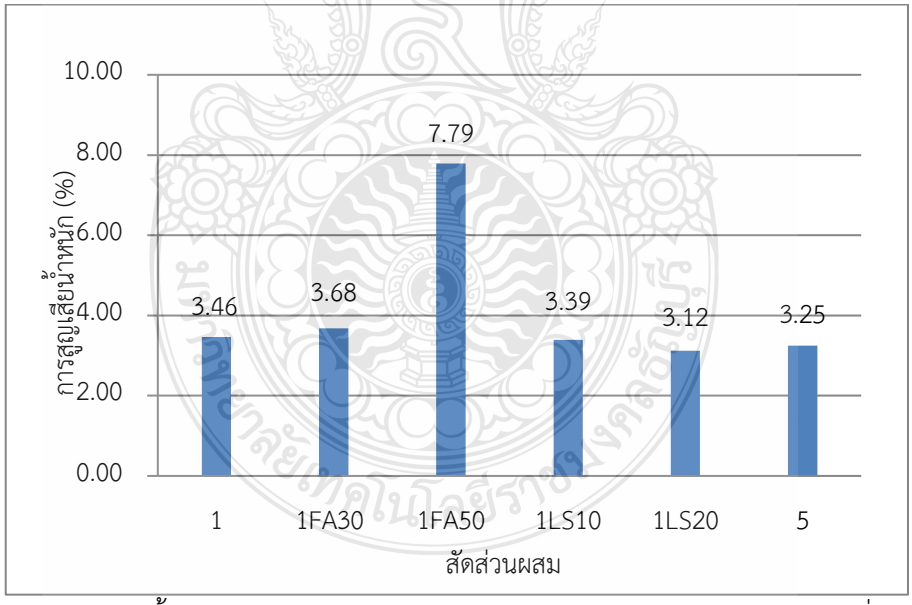
การประเมินความสามารถในการต้านทานซัลเฟตในครั้งนี้จะพิจารณาถึง การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการประเมินค่าการขยายตัวประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และผงหินปูน และเถ้าลอย [7] โดยได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ซึ่งจากความสัมพันธ์ของการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตกับอายุของตัวอย่างมอร์ต้าร์ หรือการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อายุใดๆ (รูปที่ 4.8) สามารถวัดความแตกต่างของการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ได้ชัดเจน



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 5



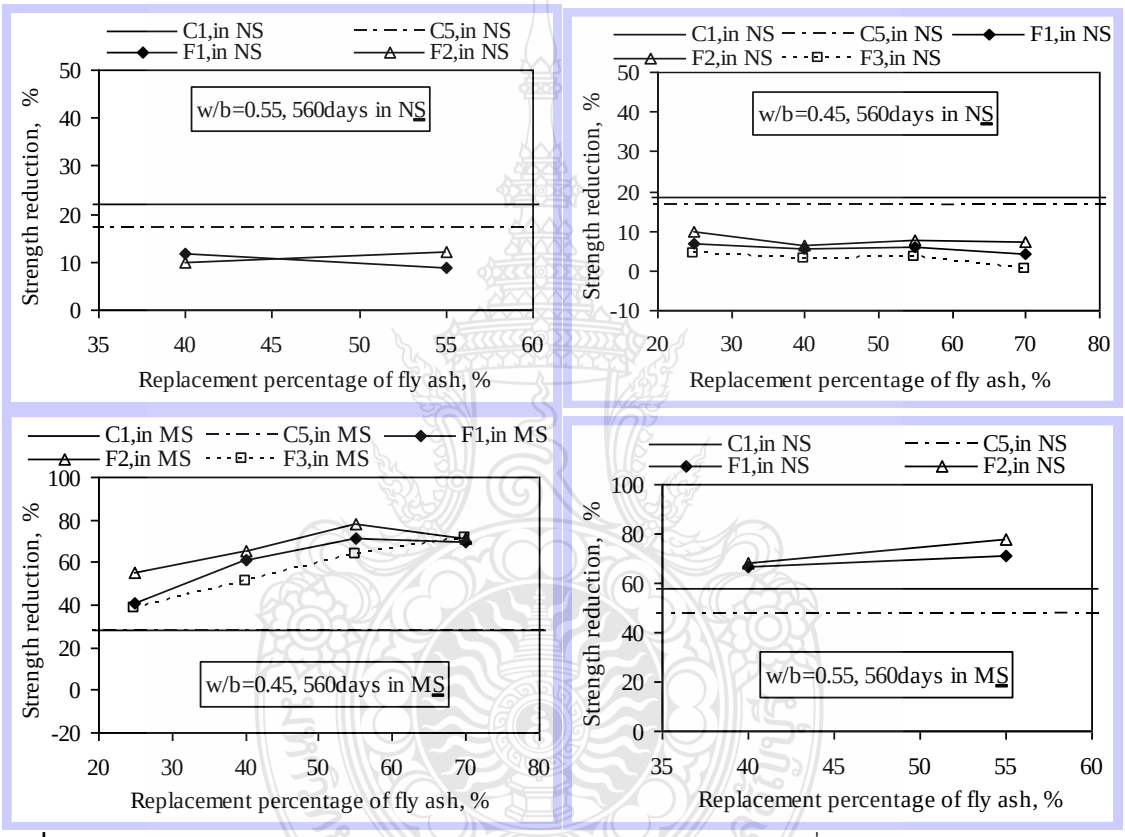
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน



รูปที่ 4.8 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุประมาณ 1,400 วัน

4.2.3 การลดลงของกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์/คอนกรีตในสารละลายซัลเฟต

การประเมินความสามารถในการต้านทานซัลเฟต เมื่อพิจารณาถึงการลดลงของกำลังอัดที่แช่ในสารละลายซัลเฟต ดังรูปที่ 4.9 [1] โดยเป็นการลดลงของกำลังอัดของมอร์ต้าร์ทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของกำลังอัดกับร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟต สามารถวัดความแตกต่างของการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ได้ชัดเจน



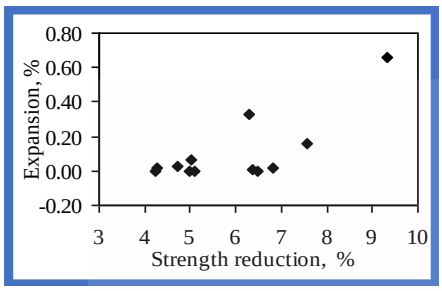
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าวการลดลงของกำลังอัดกับร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 560 วัน

4.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัว การลดลงของกำลังอัด และการสูญเสียน้ำหนัก

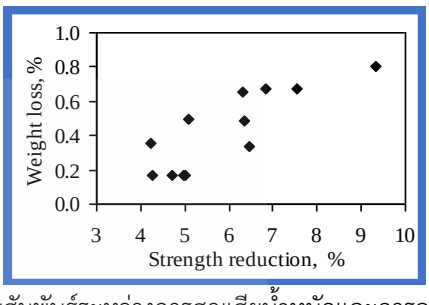
4.2.4.1 กรณีในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

จากรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัว การลดลงของกำลังอัด และการสูญเสียน้ำหนัก จะพบว่า การขยายตัว การลดลงของกำลังอัด และการสูญเสียน้ำหนักมีค่าไปทิศทางเดียวกัน นั้นแสดงว่าในการประเมินผลกระทบเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต สามารถ

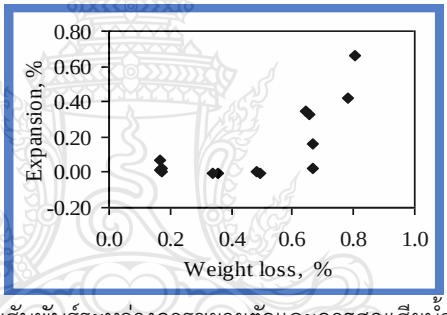
ประเมินโดยหาค่าการขยายตัว การลดลงของกำลังอัด หรือการสูญเสียน้ำหนักอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่แนะนำการประเมินโดยหาค่าการขยายตัว เพราะสามารถทำได้สะดวกกว่า การลดลงของกำลังอัด หรือการสูญเสียน้ำหนัก



ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและการลดลงกำลังอัด



ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักและการลดลงกำลังอัด

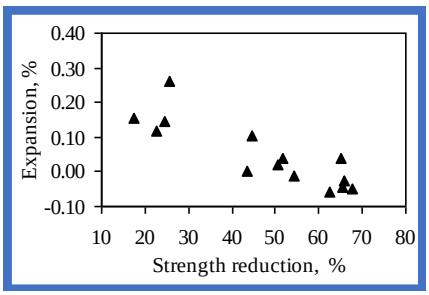


ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนัก

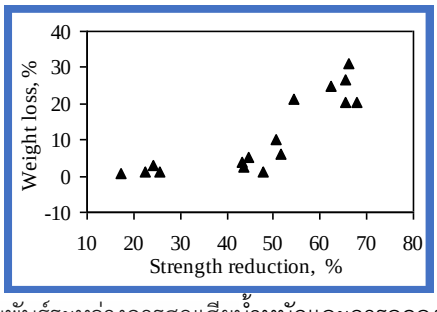
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัว การลดลงของกำลังอัด และการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

4.2.4.2 กรณีในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

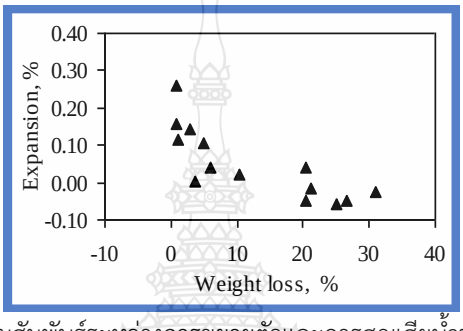
จากรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัว การลดลงของกำลังอัด และการสูญเสียน้ำหนัก จะพบว่า การสูญเสียน้ำหนักกับการลดลงของกำลังอัด และการขยายตัวกับการสูญเสียน้ำหนัก มีค่าผกผันกัน นั้นแสดงว่าในการประเมินผลกระทบเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต จะต้องหาค่าการสูญเสียน้ำหนักกับการลดลงของกำลังอัด หรือการขยายตัวกับการสูญเสียน้ำหนัก



ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและการลดลงกำลังอัด



ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักและการลดลงกำลังอัด



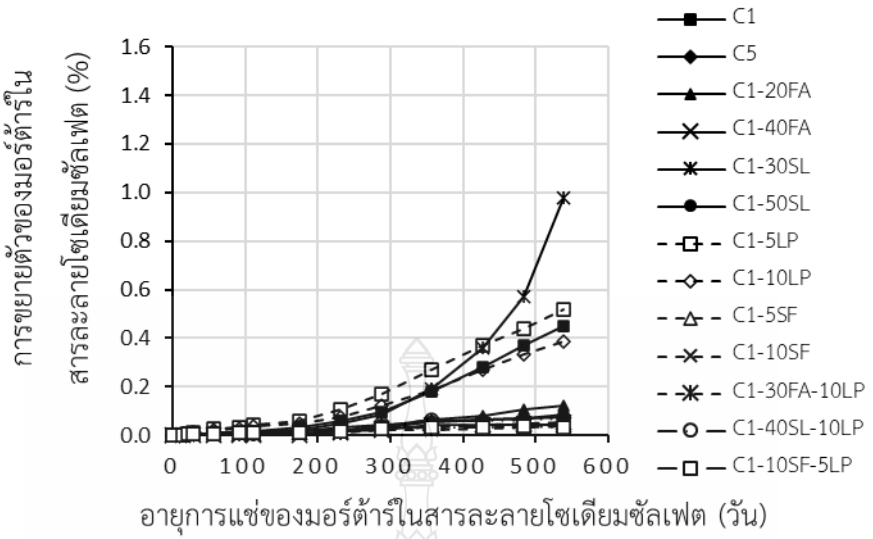
ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนัก

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัว การลดลงของกำลังอัด และการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

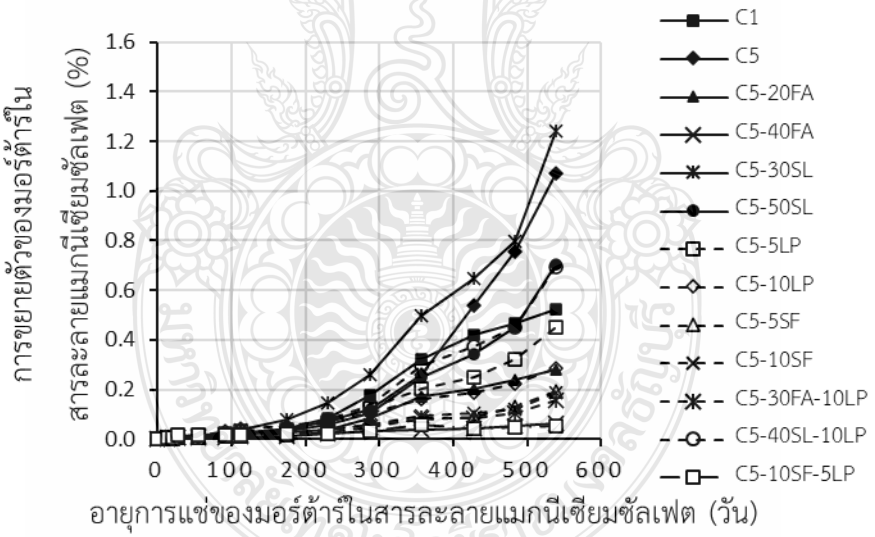
4.3 ผลกระทบที่มีต่อการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

4.3.1 ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

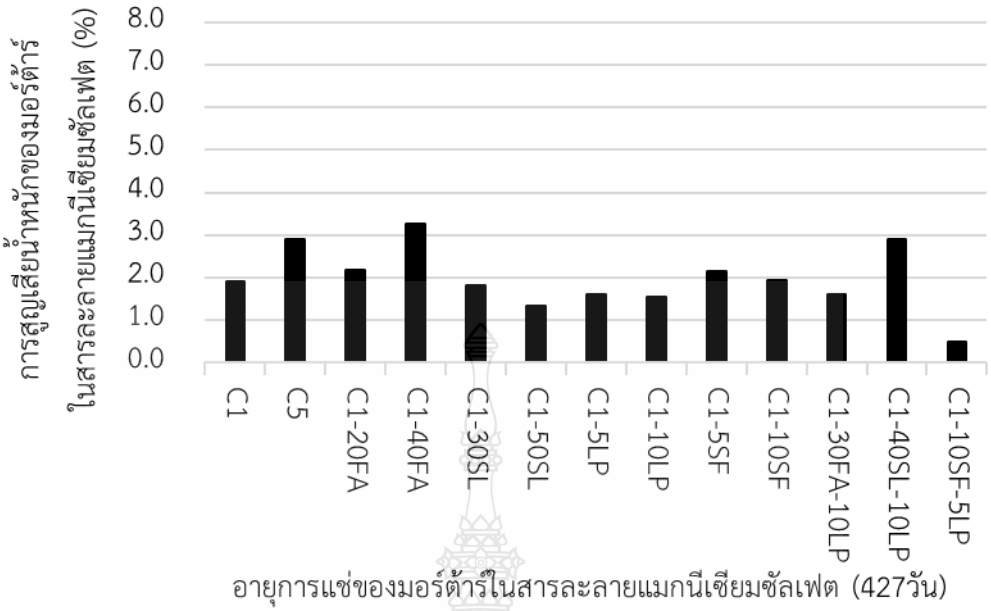
จากการศึกษาของ อภิชา หนูพันธ์ [3] เรื่องการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ สำหรับสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย ร้อยละ 20 และ 40 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 30 และ 50 ซิลิกาฟูม ร้อยละ 5 และ 10 ผงหินปูน ร้อยละ 5 และ 10 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ (W/B) เท่ากับ 0.55 สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ดังรูปที่ 4.12, ถึง รูปที่ 4.14



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เถ้าลอย ผงหินปูน ซิลิกาฟูม โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่าง มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เถ้าลอย ผงหินปูน ซิลิกาฟูม โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



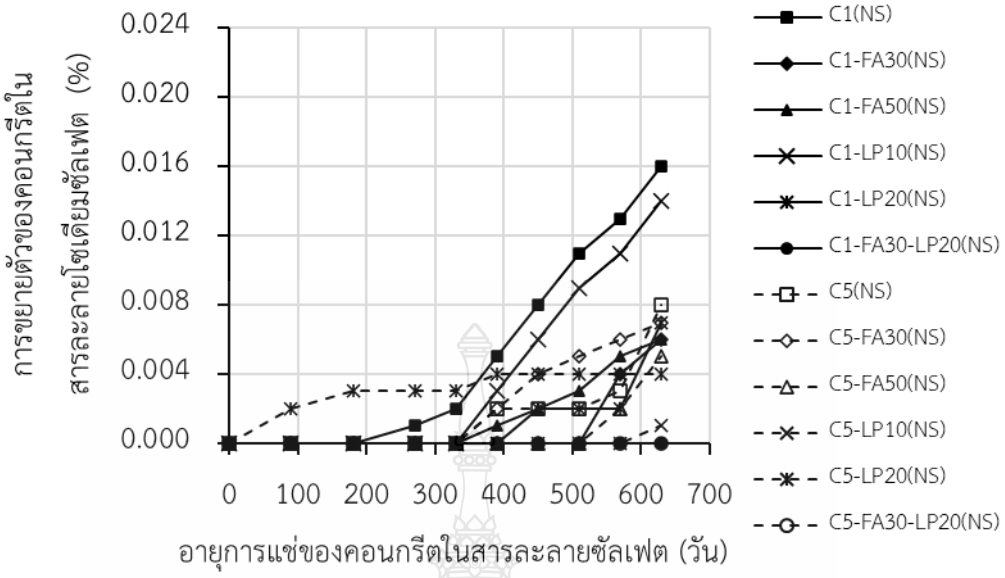
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย เถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟต จะพบว่า การขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยมีค่าใกล้เคียงหรือน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นการขยายตัวมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยที่มี CaO สูง (มากกว่าร้อยละ 10) และมอร์ต้าร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ปริมาณน้อย (น้อยกว่าร้อยละ 30) จะให้ค่าที่มากกว่าหรือใกล้เคียงมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนัก มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ต้าร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่า มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

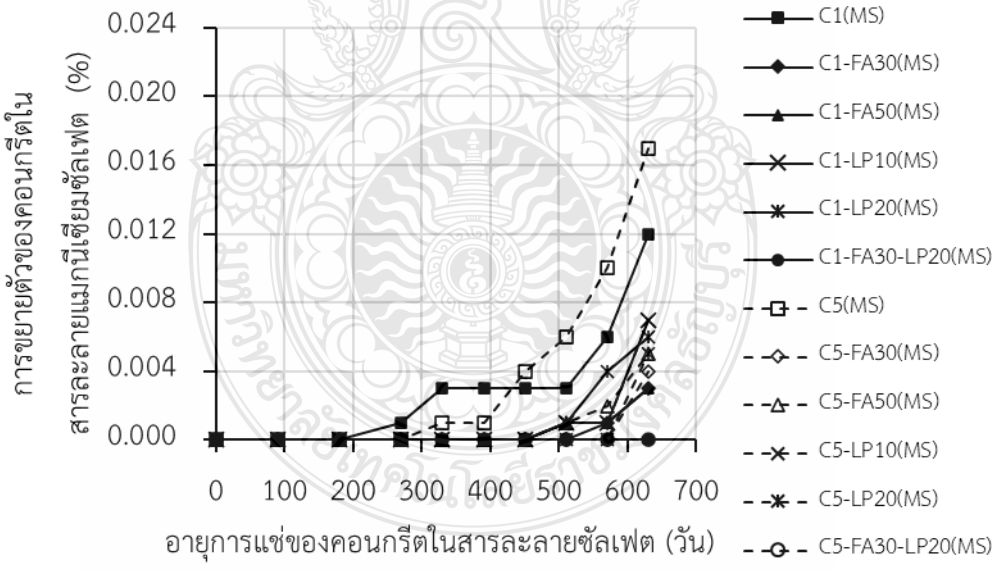
ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5

ชนิดวัสดุประสาน		การขยายตัว		การสูญเสียน้ำหนัก
		NS	MS	MS
Type 1	FA < 20%	ดีกว่า	ดีกว่า	แย่กว่า
	FA > 40%	ดีกว่า	ดีกว่า	แย่กว่า
	SL < 30%	แย่กว่า	แย่กว่า	แย่กว่า
	SL > 50%	ดีกว่า	แย่กว่า	แย่กว่า
	LP < 5%	แย่กว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	LP > 10%	แย่กว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	SF	ดีกว่า	ดีกว่า	ใกล้เคียง
	FA+LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	SL+LP	ดีกว่า	แย่กว่า	แย่กว่า
	SF+LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
Type 5	FA < 20%	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	FA > 40%	ดีกว่า	ดีกว่า	แย่กว่า
	SL > 30%	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	SL < 50%	แย่กว่า	แย่กว่า	ดีกว่า
	LP < 5%	แย่กว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	LP > 10%	แย่กว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	SF	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	FA+LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	SL+LP	ใกล้เคียง	ดีกว่า	แย่กว่า
	SF+LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า

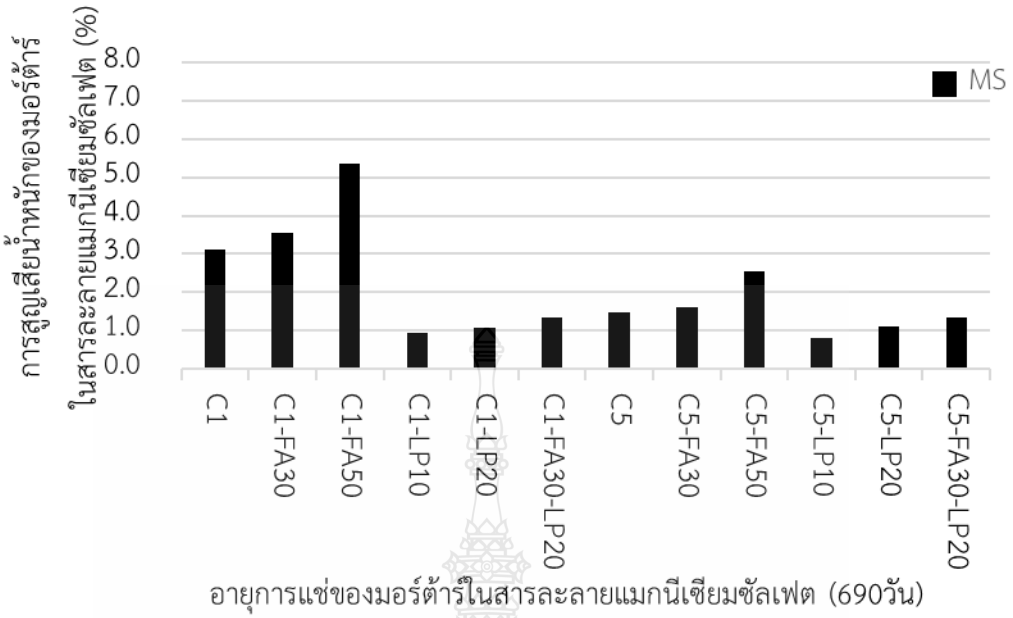
จากการศึกษาของ ยงยุทธ วัฒนกุล [4] เรื่องคุณสมบัติด้านซีเมนต์และความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน สำหรับสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย ร้อยละ 30 และ 50 ผงหินปูน ร้อยละ 10 และ 20 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ (W/B) เท่ากับ 0.55 สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ดังรูปที่ 4.15, ถึง รูปที่ 4.17



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



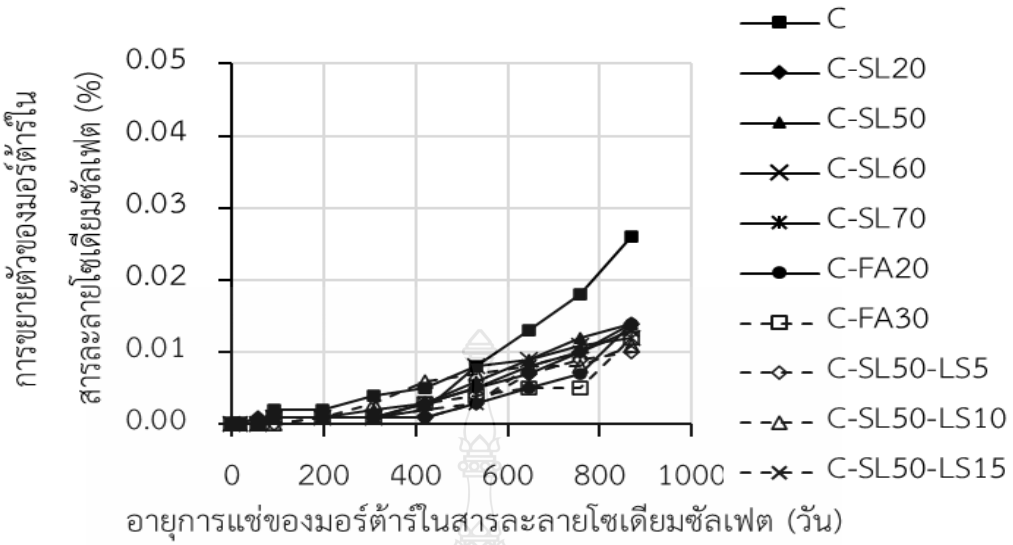
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 จะพบว่า การขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอย ผงหินปูน ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ให้การขยายตัวน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยมีค่าใกล้เคียงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าการขยายตัวตของตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอย ผงหินปูน ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ให้การขยายตัวน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยมีค่าใกล้เคียงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

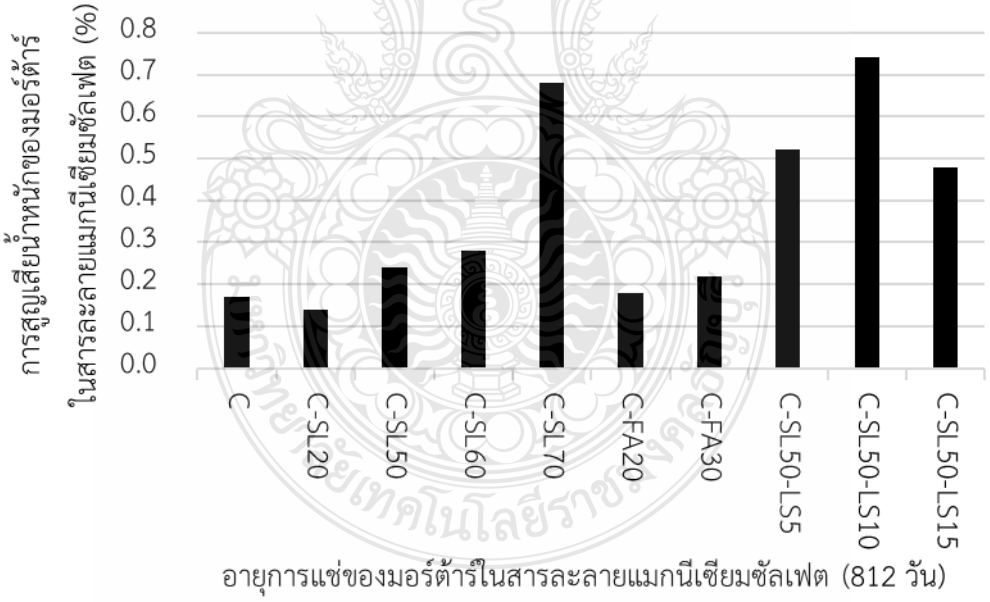
ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5

ชนิดวัสดุประสาน		การขยายตัว		การสูญเสียน้ำหนัก
		NS	MS	MS
Type 1	FA	ดีกว่า	ดีกว่า	แย่กว่า
	LP	ใกล้เคียง	ดีกว่า	ดีกว่า
	FA+LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ใกล้เคียง
Type 5	FA	ดีกว่า	ดีกว่า	แย่กว่า
	LP	แย่กว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	FA+LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า

การศึกษาของ นรากร สุดทำนอง [5] เรื่องความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด สำหรับสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20, 50, 60 และ 70 ผงหินปูนร้อยละ 5, 10 และ 15 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 30 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ (W/B) เท่ากับ 0.55 สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ดังรูปที่ 4.18 ถึงรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เถ้าลอย และ ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



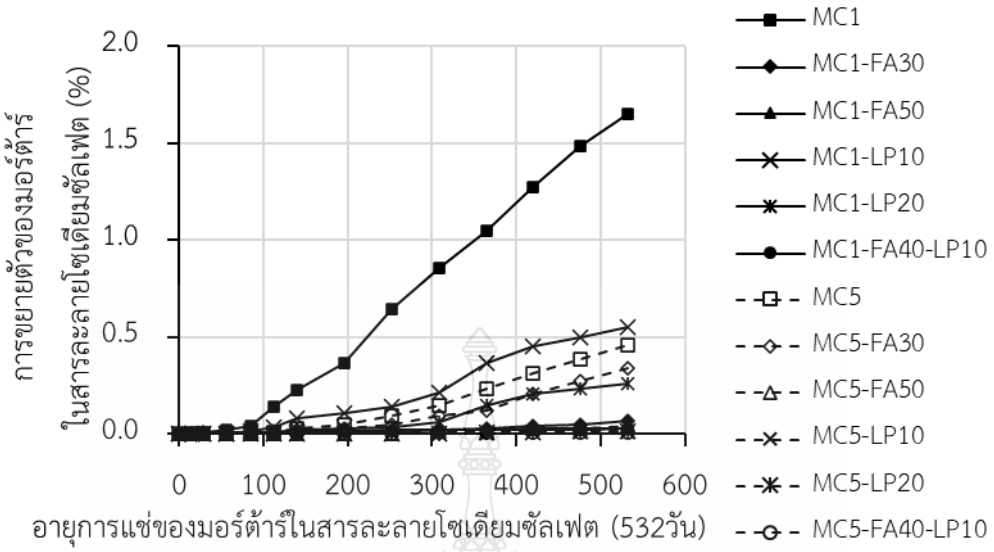
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อ เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 จะพบว่า การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดช่วยลดการขยายตัวมากขึ้นหากแต่ผสมในอัตราส่วนที่พอดีและถ้านำฝุ่นหินปูนมาผสมลงไปก็ยิ่งช่วยในการลดการขยายตัวได้ดีขึ้น เมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปะเภทที่ 1 เพียงอย่างเดียว ส่วนการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่า ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย คอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพียงอย่างเดียว

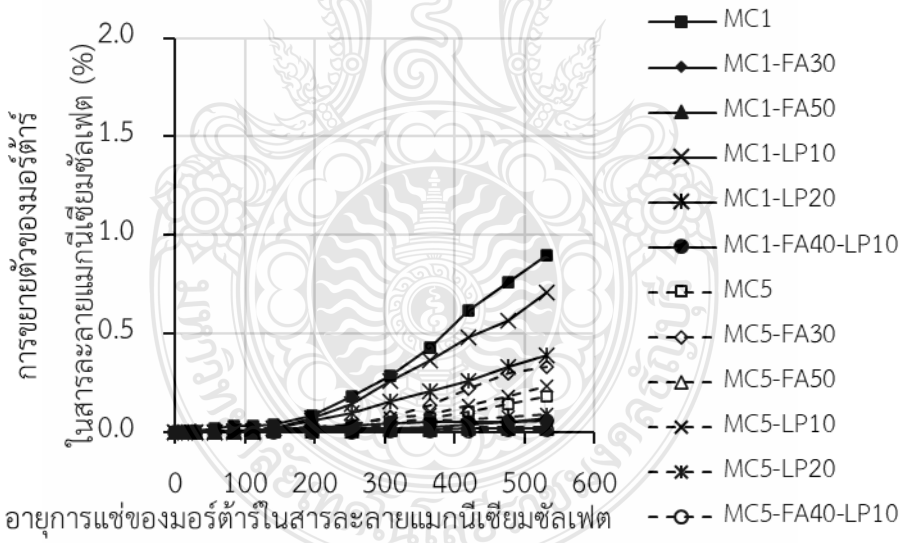
ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อ เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

ชนิดวัสดุประสาน		การขยายตัว	การสูญเสียน้ำหนัก
		NS	MS
Type 1	FA	ดีกว่า	แย่กว่า
	SL	ดีกว่า	ใกล้เคียง
	SL+LS	ดีกว่า	แย่กว่า

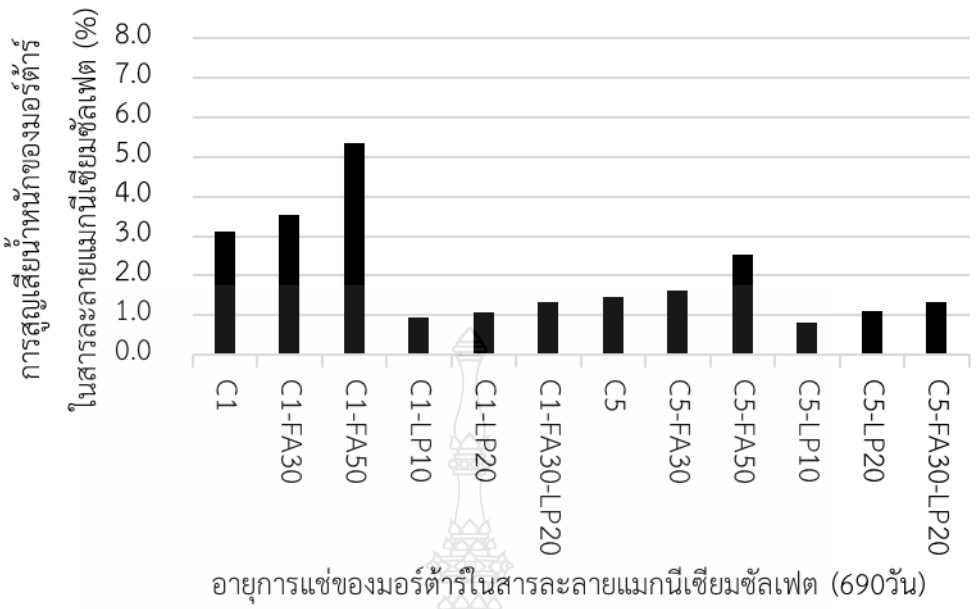
จากการศึกษาของ นพคุณ ผลโพธิ์ [6] เรื่องผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ สำหรับสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย ร้อยละ 30 และ 50 ผงหินปูน ร้อยละ 10 และ 20 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ (W/B) เท่ากับ 0.55 สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ดังรูปที่ 4.20 ถึง รูปที่ 4.22



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอย ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



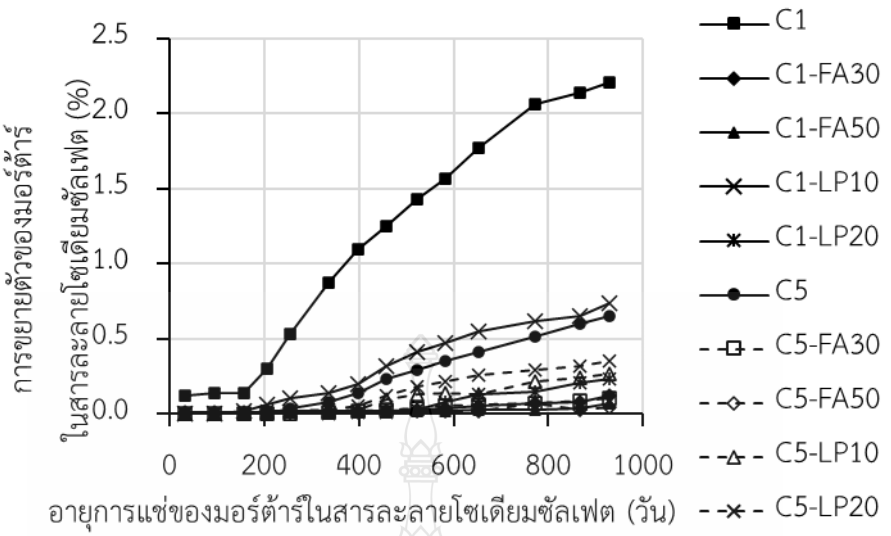
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55

จากตารางที่ 4.4 แสดงผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 จะพบว่า การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะให้ค่ามากที่สุด ถัดมาเป็นสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ตามลำดับ มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย และผงหินปูนให้ค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูน และเถ้าลอยที่ปริมาณน้อย (ที่มีค่า CaO สูง) จะมีค่าการขยายตัวที่มากกว่าหรือใกล้เคียงมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต มอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนจะให้ค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ในขณะมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยจะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

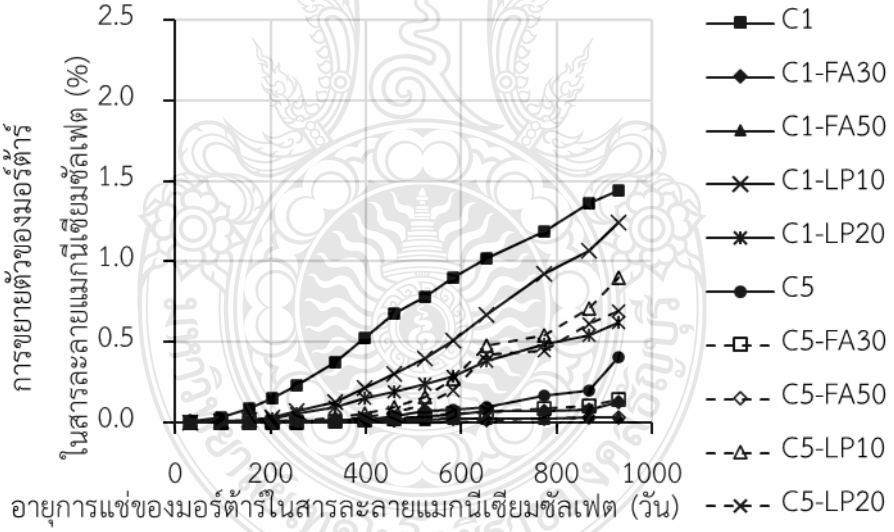
ตารางที่ 4.4 ผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5

ชนิดวัสดุประสาน		การขยายตัว		การสูญเสียน้ำหนัก
		NS	MS	MS
Type 1	FA	ดีกว่า	ดีกว่า	แย่กว่า
	LP	ใกล้เคียง	ดีกว่า	ดีกว่า
	FA+LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ใกล้เคียง
Type 5	FA	ดีกว่า	ดีกว่า	แย่กว่า
	LP	แย่กว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	FA+LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า

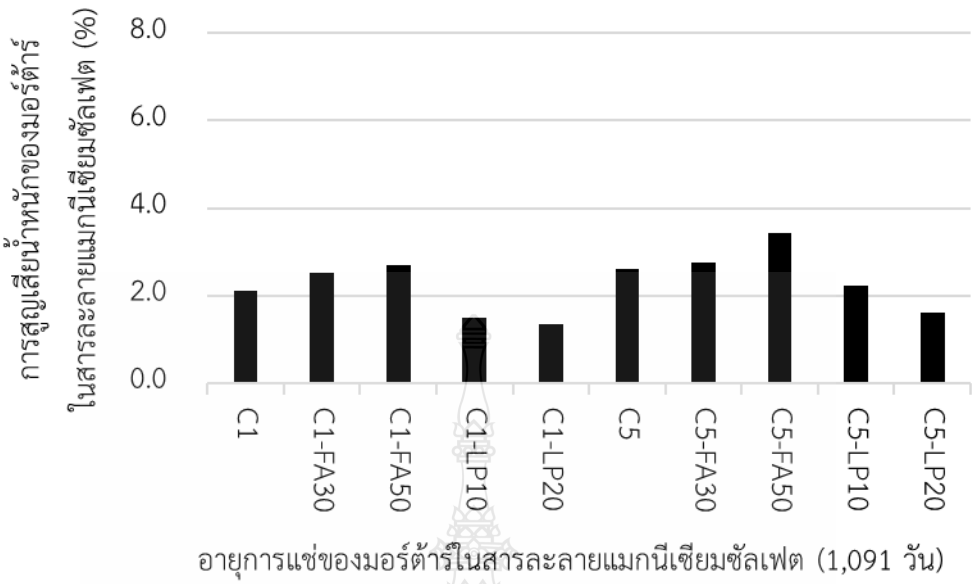
จากการศึกษาของ สุรพงศ์ หมวกนาค [7] เรื่องความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายซัลเฟต สำหรับสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผงหินปูน ร้อยละ 10 และ 20 เถ้าลอย ร้อยละ 30 และ 50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ (W/B) เท่ากับ 0.55 ดังรูปที่ 4.23 ถึง รูปที่ 4.25



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอย ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



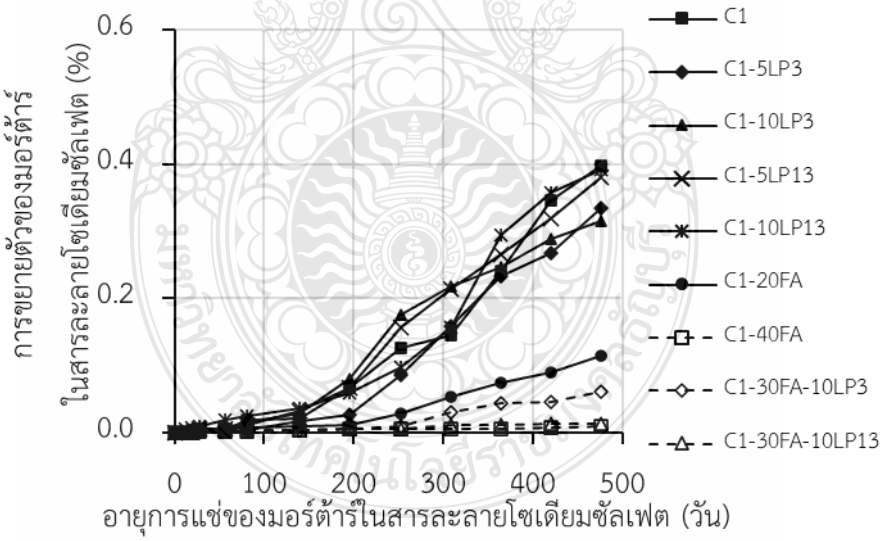
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55

จากตารางที่ 4.5 แสดงผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 จะพบว่า การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะให้ค่ามากที่สุด ถัดมาเป็นสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ตามลำดับ มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย และผงหินปูนให้ค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่าใกล้เคียงมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้ค่าสูญเสียน้ำหนักมากกว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต มอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักใกล้เคียงมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยปริมาณที่สูง จะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5

ชนิดวัสดุประสาน		การขยายตัว		การสูญเสียน้ำหนัก
		NS	MS	MS
Type 1	FA	ดีกว่า	ดีกว่า	แย่กว่า
	LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
Type 5	FA	ดีกว่า	ดีกว่า	แย่กว่า
	LP	แย่กว่า	ดีกว่า	ดีกว่า

จากการศึกษาของ ชัยณรงค์ เรื่องเลือ [8] เรื่องการขยายตัวของมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในสารละลายซัลเฟต สำหรับสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย ร้อยละ 20 ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (LP3) และ ผงหินปูนขนาด 13 ไมครอน (LP13) ร้อยละ 10 และ 20 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ (W/B) เท่ากับ 0.55 ดังรูปที่ 4.26



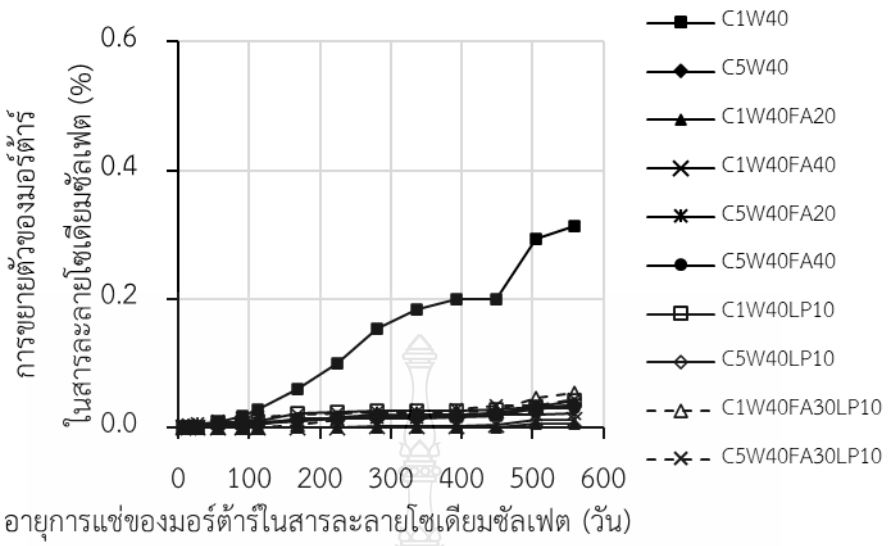
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย เถ้าลอย ผงหินปูน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55

จากตารางที่ 4.6 แสดงผลการศึกษาการขยายตัวของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 จะพบว่า การขยายตัวของมอร์ต้าร์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยผงหินปูนขนาด 3 ไมโครเมตร และขนาด 13 ไมโครเมตร ในอัตราส่วน ร้อยละ 5 และ ร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยผงหินปูน จะมีค่าการขยายตัวน้อยกว่า มอร์ต้าร์ปูนซีเมตร์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

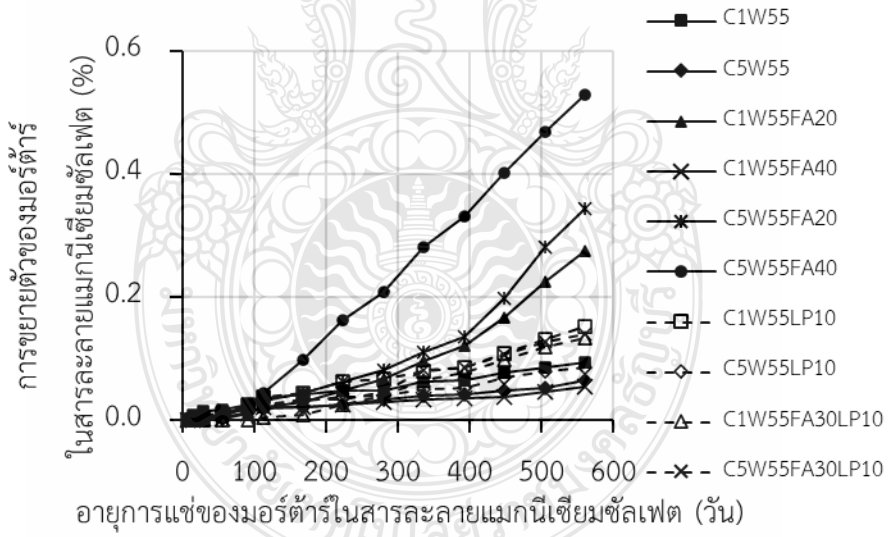
ตารางที่ 4.6 ผลการศึกษาการขยายตัวของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

ชนิดวัสดุประสาน		การขยายตัว
		NS
Type 1	LP3	ดีกว่า
	LP 13	เทียบเท่า
	FA	ดีกว่า
	FA+LP3	ดีกว่า
	FA+LP13	ดีกว่า

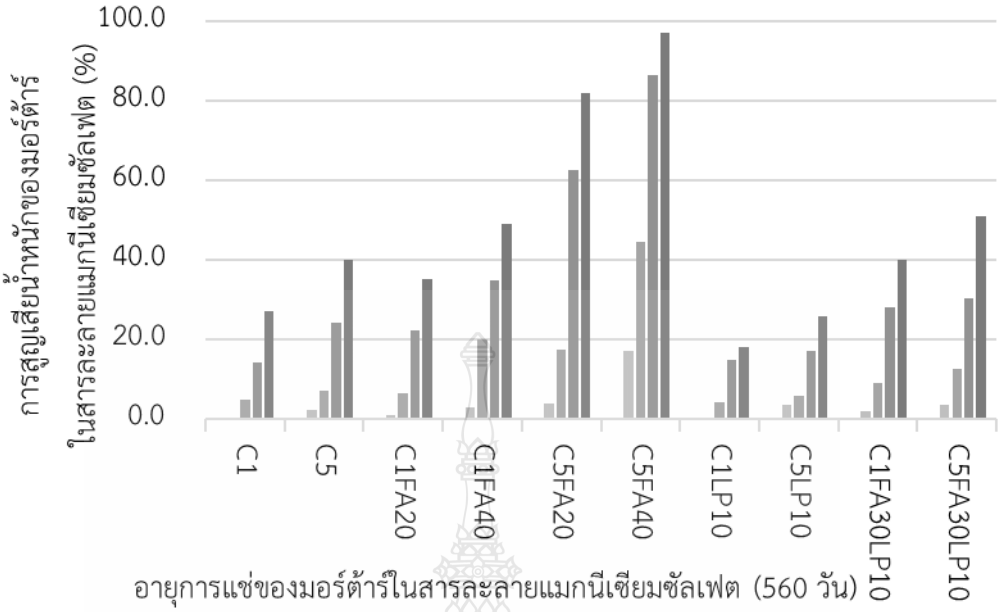
จากการศึกษาของ ปรีดา พันธุ์พงศ์ [9] เรื่องผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ สำหรับสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย ร้อยละ 20 และ 40 หินปูน ร้อยละ 10 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ (W/B) เท่ากับ 0.55 และ 0.40 สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ดังรูปที่ 4.27 ถึง รูปที่ 4.29



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40



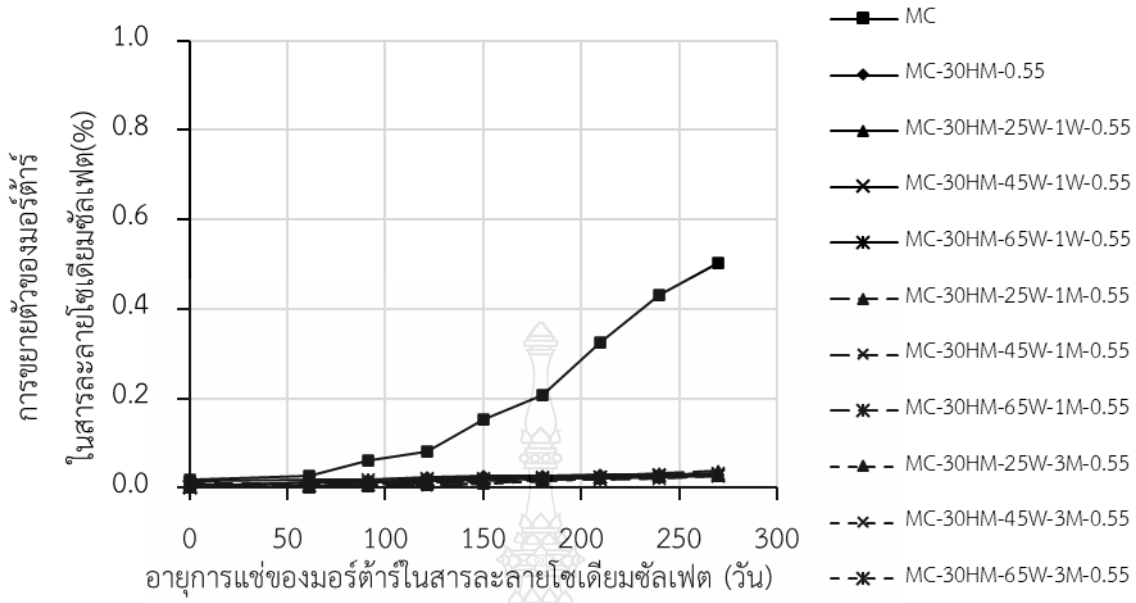
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40

จากตารางที่ 4.7 แสดงผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อ เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 จะพบว่า การขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย และผงหินปูนในสารละลายซัลเฟตมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ยกเว้นแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO สูง (ร้อยละ 19.19) ในปริมาณที่น้อย (ร้อยละ 10) ให้ค่าการขยายตัวมากกว่าของนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ในขณะการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย และผงหินปูนในสารละลายซัลเฟตมีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

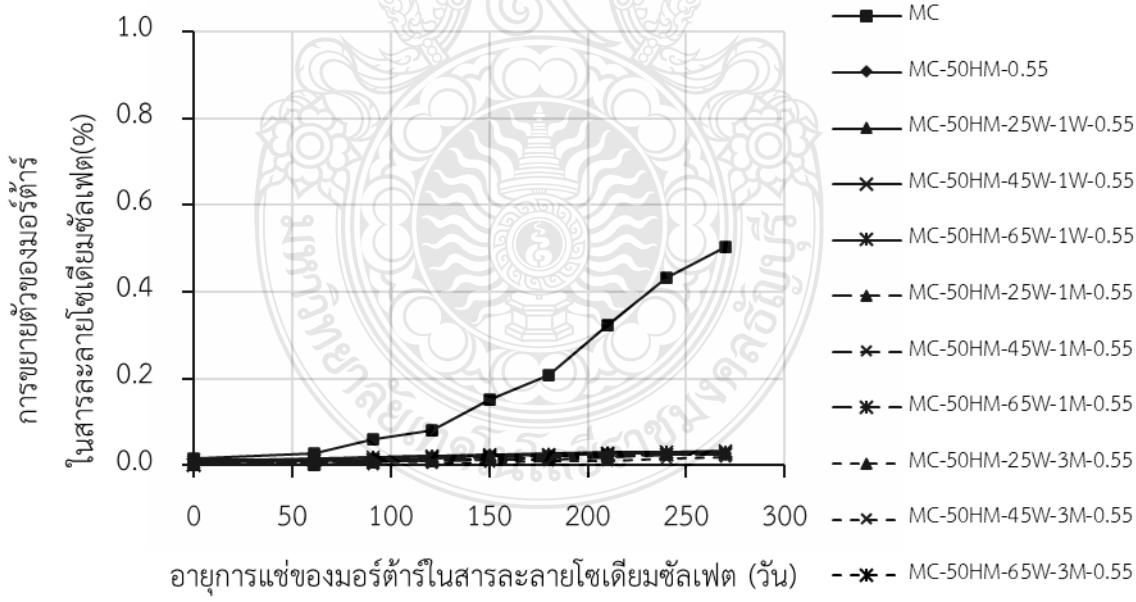
ตารางที่ 4.7 ผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อ เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5

ชนิดวัสดุประสาน		การขยายตัว		การสูญเสียน้ำหนัก
		NS	MS	MS
Type 1	FA	ดีกว่า	ดีกว่า	แย่กว่า
	LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	FA+LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
Type 5	FA	ดีกว่า	ดีกว่า	แย่กว่า
	LP	แย่กว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	FA+LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า

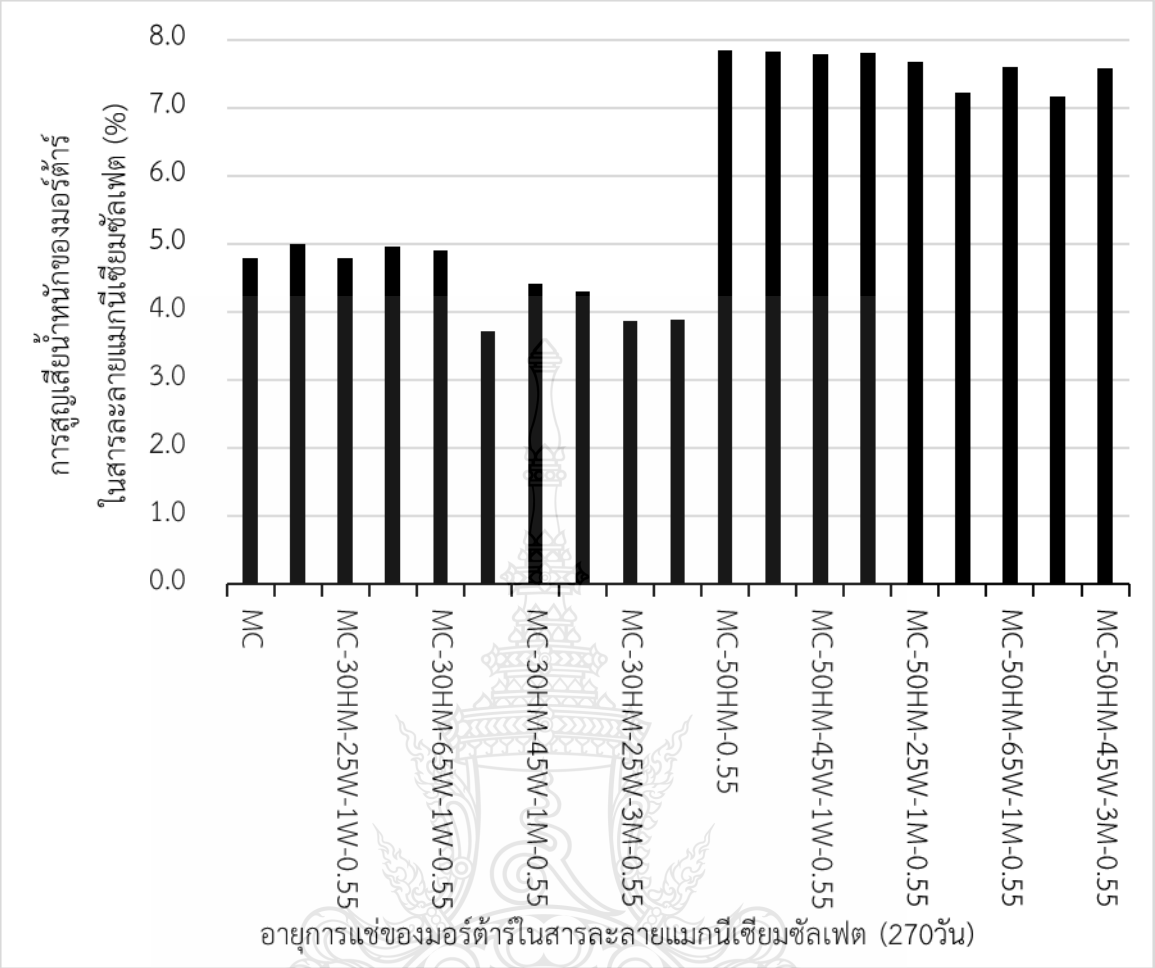
จากการศึกษาของ เอกราช จำนงค์รัตน์ [10] เรื่องสมบัติเบื้องต้นและการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก สำหรับสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียก ร้อยละ 30 และ 50 เถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการที่ความชื้น ร้อยละ 25 45 และ 65 โดยสัมผัสความชื้นที่ 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือน จากโรงไฟฟ้า BLCP จ.ระยอง ที่ได้จากถ่านหินที่ผสมระหว่าง Hunter Valley และ Melawan (HM) ซึ่งมีปริมาณ CaO ต่ำ (Low CaO) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ (W/B) เท่ากับ 0.55 สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ดังรูปที่ 4.30 ถึง รูปที่ 4.32



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55

จากตารางที่ 4.8 แสดงผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 จะพบว่า การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ทั้งผสมเถ้าลอยแห้งและผสมเถ้าลอยเปียกมีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน โดยการขยายตัวในสารละลายโซเดียมของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งมีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียก นอกจากนี้ พบว่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่มีความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือน มีค่าไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.8 ผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5

ชนิดวัสดุประสาน		การขยายตัว	การสูญเสียน้ำหนัก
		NS	MS
Type 1	FA แห้ง	ดีกว่า	แย่กว่า
	FA เปียก	ดีกว่า	ดีกว่า
Type 5	FA แห้ง	ดีกว่า	แย่กว่า
	FA เปียก	ดีกว่า	ดีกว่า

จากการศึกษากลไกการทำลายคอนกรีตโดยซัลเฟต และผลกระทบที่มีต่อการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต เนื่องจากผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน สามารถสรุปได้ดังตาราง 4.9

1. เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

กรณีที่มีปริมาณ CaO สูง (ร้อยละ 16.52) และปริมาณแทนที่น้อย (ร้อยละ 20) จะให้ค่าการขยายตัวที่มากกว่าหรือใกล้เคียงตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มาก (ร้อยละ 20) จะให้ค่าการขยายตัวที่น้อยกว่าตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนกรณีที่มีปริมาณ CaO ต่ำ จะให้ค่าการขยายตัวที่น้อยกว่าตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากการแทนที่เถ้าลอยซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 16.52) ในปริมาณที่น้อยนั้นปฏิกิริยาปอซโซลาน เกิดน้อยซึ่งทำให้ลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ ได้น้อยทำให้ Ettrigite เกิดมาก ในขณะที่ตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 มีค่าการขยายตัวที่น้อยกว่าตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ร้อยละ 40 จะเหลือปริมาณ $Ca(OH)_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นน้อย ทำให้เกิด Ettrigite น้อย ส่วนการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่า ตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เหตุผลเช่นเดียวกับกรณีสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ส่วนการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย จะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ $Ca(OH)_2$ ลดลง ความเป็นด่างลดลง ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ จึงทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เป็นเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสานโดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้น

2. เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

การขยายตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่ามากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากผงหินปูนไม่มีคุณสมบัติทำปฏิกิริยาทางเคมีแต่มีคุณสมบัติทางกายภาพกล่าวคือ ผงหินปูนจะไปอุดช่องว่างในคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความแน่นเพิ่มขึ้นและทำให้ช่องว่างน้อยลง เมื่อสารละลายโซเดียมซัลเฟต เข้าไปทำปฏิกิริยากัล $Ca(OH)_2$ ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในคอนกรีตทำให้เกินยิปซั่มและ Ettrigite ทำให้เกิดการขยายตัว เนื่องจากคอนกรีตเหลือช่องว่างให้ขยายตัวน้อยแต่ Ettrigite ยังเกิดการขยายตัวต่อไปเรื่อยๆ จนทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว จึงทำให้ คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 มีการขยายตัวมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน กรณีในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การขยายตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากผงหินปูนไม่มีคุณสมบัติทำปฏิกิริยาทางเคมีแต่มีคุณสมบัติทางกายภาพกล่าวคือ ผงหินปูนจะไปอุดช่องว่างในคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความแน่นเพิ่มขึ้นและทำให้ช่องว่างน้อยลงและทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ส่วนการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตที่ผสมผงหินปูน ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจาก ผงหินปูนไม่มีคุณสมบัติทำปฏิกิริยาทางเคมีแต่มีคุณสมบัติทางกายภาพกล่าวคือ ผงหินปูนจะไปอุดช่องว่างในคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความแน่นเพิ่มขึ้นและทำให้ช่องว่างน้อยลงและทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

3. เมื่อแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

การขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด กรณีในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เมื่อแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดปริมาณน้อย (น้อยกว่าร้อยละ 30) จะให้ค่าการขยายตัวที่มากกว่าหรือใกล้เคียงตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่เมื่อแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่มาก (มากกว่าร้อยละ 30) จะให้ค่าการขยายตัวที่น้อยกว่าตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากการแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 32.05) ในปริมาณที่น้อยนั้นปฏิกิริยาปอซโซลาน เกิดน้อยซึ่งทำให้ลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ ได้น้อยทำให้ Ettrigite เกิดมาก ในขณะที่ตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 มีค่าการขยายตัวที่น้อยกว่าตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจาก

การแทนที่ร้อยละ 50 จะเหลือปริมาณ $Ca(OH)_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นน้อย ทำให้เกิด Ettrigite น้อย กรณีในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต จะมีค่าการขยายตัวมากกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลานและวัสดุซีเมนต์ส่งผลทำให้สามารถลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ ได้มากจึงทำให้ไม่มีเสถียรภาพเกิดการหลุดร่อน ทำให้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ง่าย

ส่วนการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด จะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เหตุผลเช่นเดียวกับคอนกรีตผสมเถ้าลอย

4. เมื่อแทนที่ซิลิกาฟูมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

การขยายตัวของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม กรณีในสารละลายโซเดียมซัลเฟต การขยายตัวมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ รวมทั้ง ซิลิกาฟูมมีความละเอียดสูง ซึ่งจะเข้าไปช่วยเติมเต็มช่องว่างในคอนกรีตจึงทำให้สารละลายโซเดียมซัลเฟต เข้าไปทำลายได้ยากส่งผลให้ค่าการขยายตัวน้อย กรณีในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การขยายตัวของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมมีค่าน้อยกว่า ตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เหตุผลเช่นเดียวกับกรณีสารละลายโซเดียมซัลเฟต

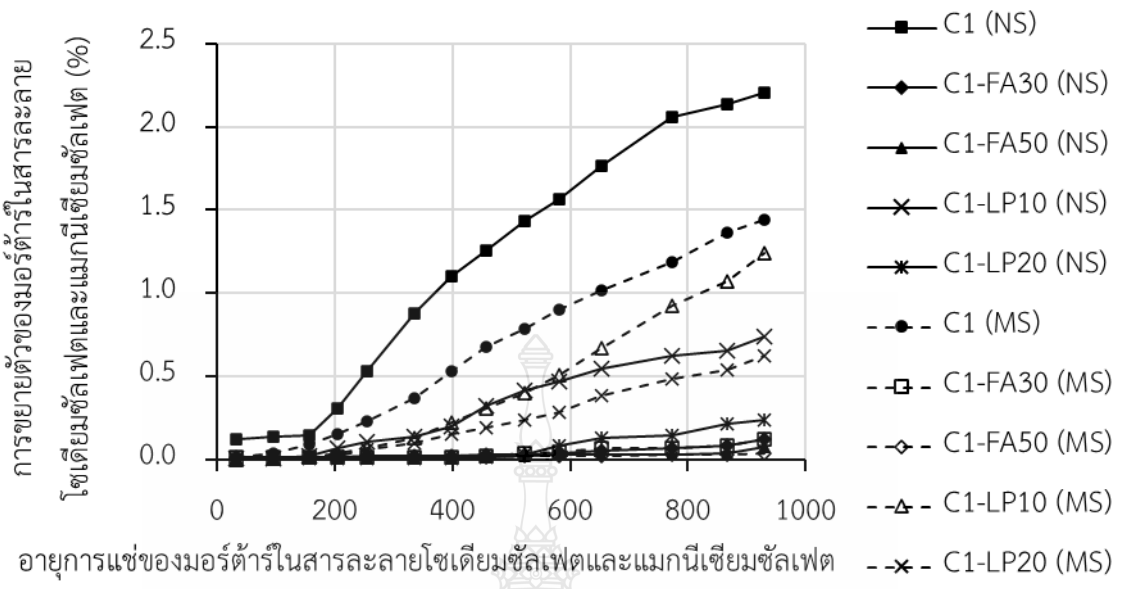
ส่วนการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักใกล้เคียงตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจาก ซิลิกาฟูมจะเป็นวัสดุปอซโซลาน จากปฏิกิริยาปอซโซลานจะลด $Ca(OH)_2$ ลดความเป็นด่างลง ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ แต่เนื่องจาก ซิลิกาฟูมมีความละเอียดสูง จึงสามารถไปเติมเต็มช่องว่าง จึงทำให้สารละลายแมกนีเซียมเข้าไปทำลายได้ยากขึ้น

ตารางที่ 4.9 สรุปผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์

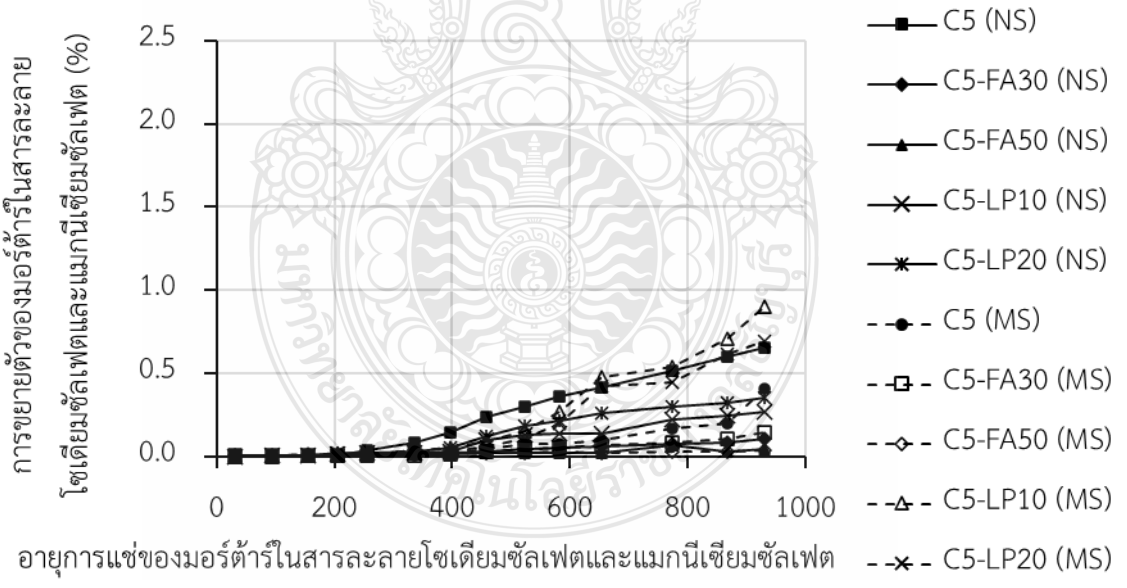
ชนิดวัสดุประสาน		การขยายตัว		การสูญเสียน้ำหนัก
		NS	MS	MS
Type 1	FA	ดีกว่า	ดีกว่า	แย่กว่า
	SL	ดีกว่า	แย่กว่า	แย่กว่า
	LP	แย่กว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	SF	ดีกว่า	ดีกว่า	ใกล้เคียง
	FA+LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	SL+LP	ดีกว่า	แย่กว่า	แย่กว่า
	SF+LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
Type 5	FA	ดีกว่า	ดีกว่า	แย่กว่า
	SL	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	LP	แย่กว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	SF	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	FA+LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	SL+LP	ใกล้เคียง	ดีกว่า	แย่กว่า
	SF+LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า

4.3.2 ผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟต

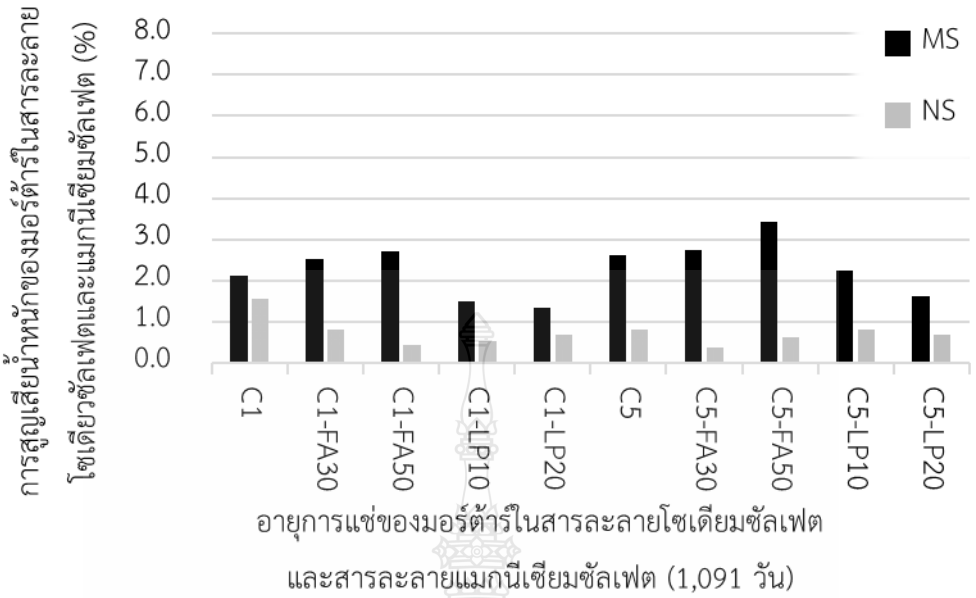
จากการศึกษาของ สุรพงศ์ หมวกนาค [7] เรื่องความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายซัลเฟต สำหรับสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอยร้อยละ 30 และ 50 ผงหินปูน ร้อยละ 10 และ 20 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ (W/B) เท่ากับ 0.55 สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ดังรูปที่ 4.33 ถึง รูปที่ 4.35



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้งและ ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้ง และ ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



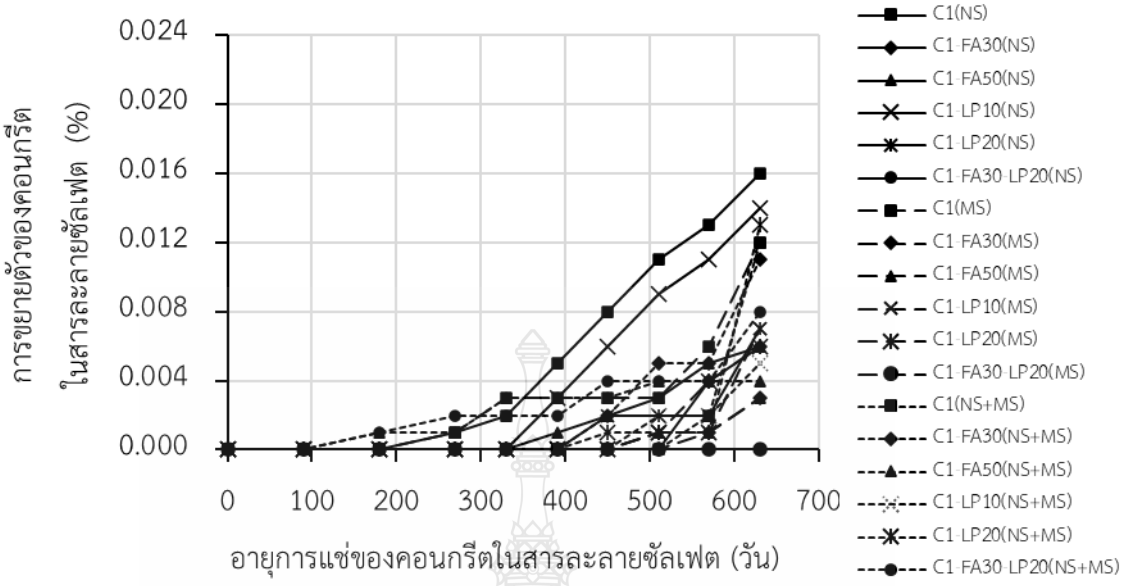
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55

จากตารางที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานซัลเฟตเมื่อพิจารณาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต โดยเทียบสารละลายโซเดียมซัลเฟต (NS) จะพบว่า การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะให้ค่ามากที่สุด ถัดมาเป็นสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ตามลำดับ มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย และผงหินปูนให้ค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่าใกล้เคียงมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้ค่าสูญเสียน้ำหนักมากกว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต มอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักใกล้เคียงมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยปริมาณที่สูง จะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

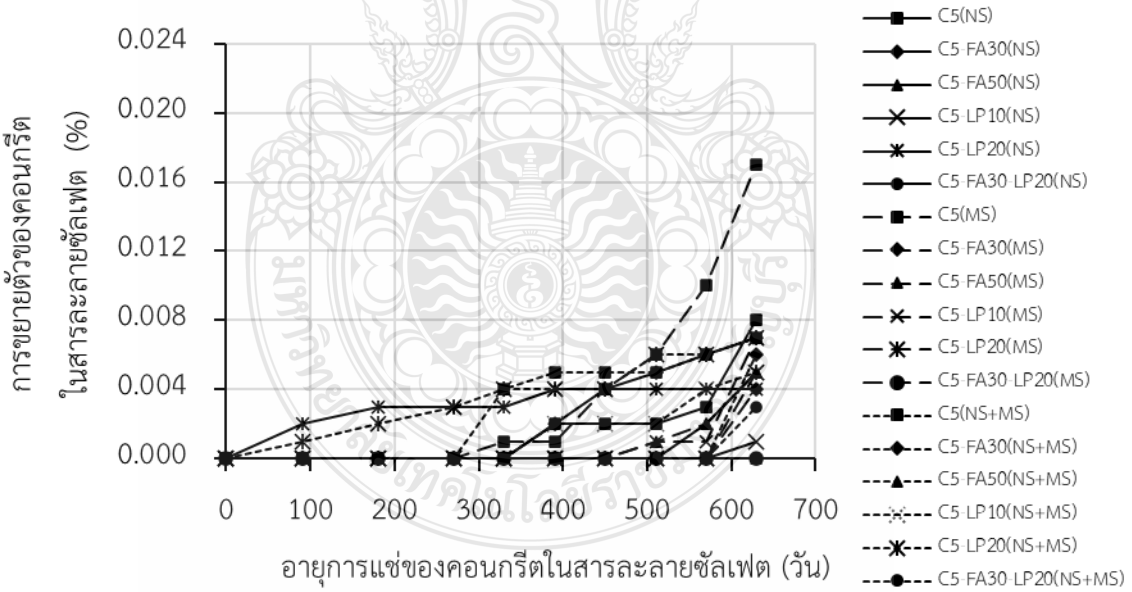
ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบผลกระทบของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานซัลเฟตเมื่อพิจารณาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต โดยเทียบสารละลายโซเดียมซัลเฟต (NS)

ชนิดวัสดุประสาน	การขยายตัว	การสูญเสียน้ำหนัก
	MS	MS
Type 1	ดีกว่า	แย่กว่า
FA	ใกล้เคียง	แย่กว่า
LP	แย่กว่า	แย่กว่า
Type 5	ดีกว่า	แย่กว่า
FA	ใกล้เคียง	แย่กว่า
LP	ดีกว่า	แย่กว่า

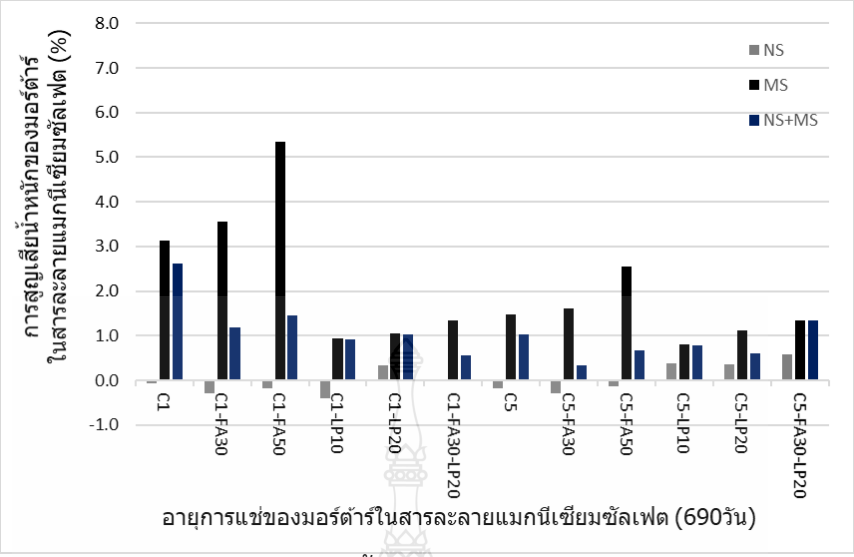
จากการศึกษาของ ยงยุทธ วัฒนกุล [4] เรื่องคุณสมบัติด้านซีเมนต์และความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน สำหรับสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย ร้อยละ 30 และ 50 ผงหินปูน ร้อยละ 10 และ 20 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ (W/B) เท่ากับ 0.55 สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตดังรูปที่ 4.36 ถึง รูปที่ 4.38



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย เถ้าลอยแห้ง และ ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้ง และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



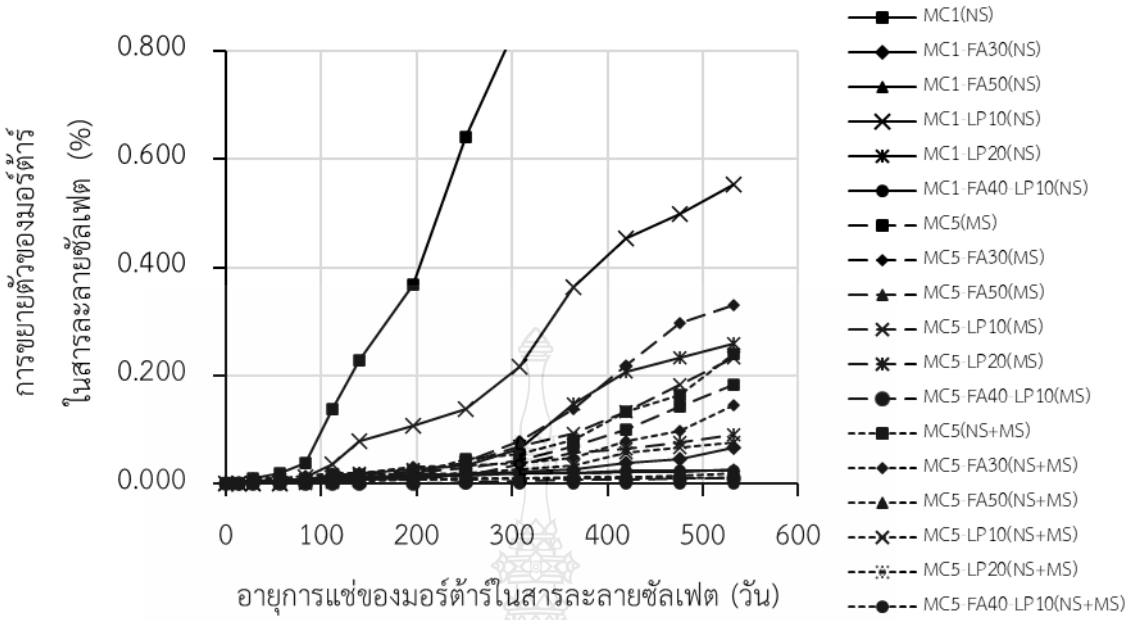
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55

จากตารางที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานซัลเฟตเมื่อพิจารณาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ โดยเทียบสารละลายโซเดียมซัลเฟต (NS) จะพบว่า การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกับคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ส่วนการสูญเสียน้ำหนัก ของตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียม และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต มีแนวโน้มในทิศทางตรงกันข้ามกับคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

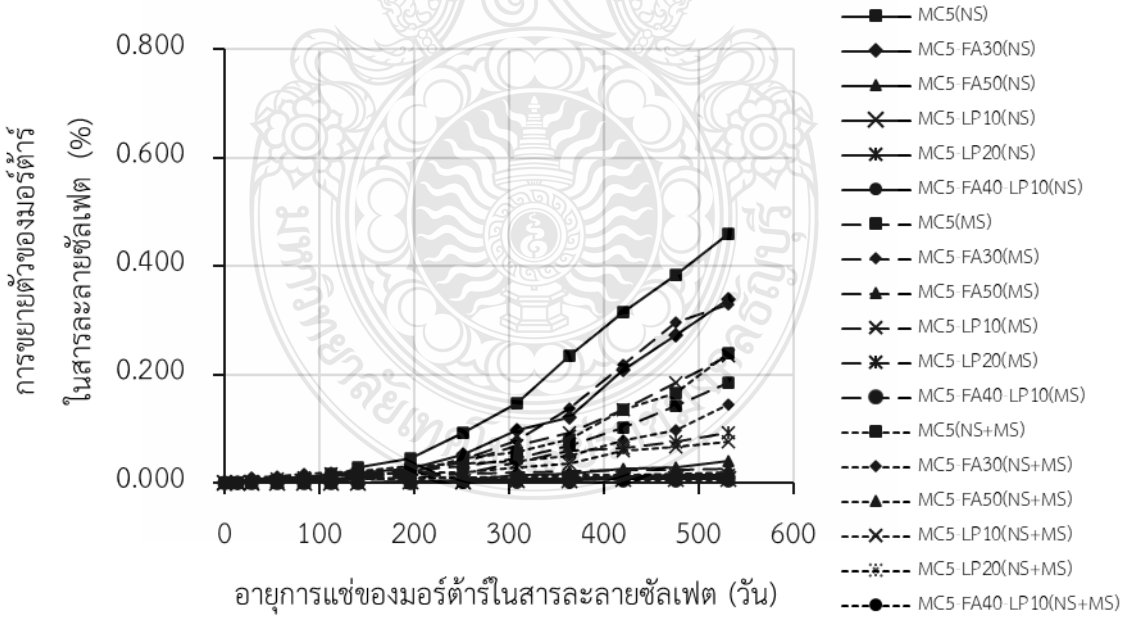
ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบผลกระทบของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานซัลเฟตเมื่อพิจารณาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์โดยเทียบสารละลายโซเดียมซัลเฟต (NS)

ชนิดวัสดุประสาน	การขยายตัว		การสูญเสียน้ำหนัก	
	MS	NS+MS	MS	NS+MS
Type 1	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง	แย่กว่า	แย่กว่า
FA	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง	แย่กว่า	ใกล้เคียง
LP	แย่กว่า	แย่กว่า	แย่กว่า	แย่กว่า
FA+LP	ใกล้เคียง	แย่กว่า	แย่กว่า	ใกล้เคียง
Type 5	แย่กว่า	ใกล้เคียง	แย่กว่า	แย่กว่า
FA	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง	แย่กว่า	ใกล้เคียง
LP	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง
FA+LP	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง	แย่กว่า	แย่กว่า

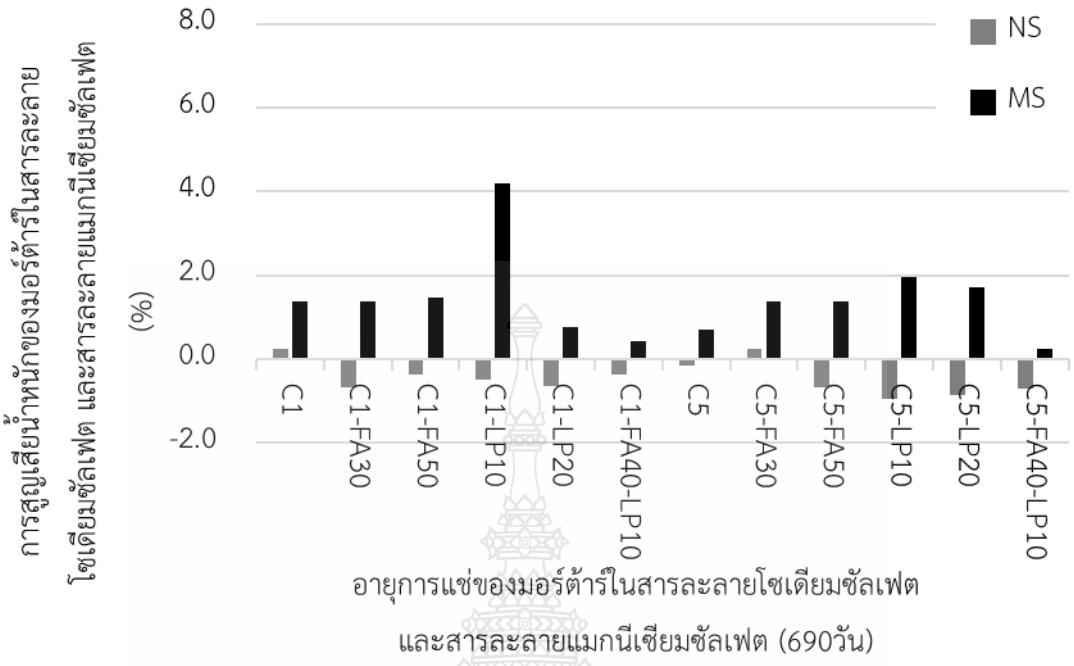
จากการศึกษาของ นพคุณ ผลโพธิ์ [6] เรื่องผลกกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ สำหรับสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย ร้อยละ 30 และ 50 ผงหินปูน ร้อยละ 10 และ 20 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ (W/B) เท่ากับ 0.55 สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ดังรูปที่ 4.39 ถึง รูปที่ 4.41



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย เถ้าลอยแห้ง และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอยแห้ง และ ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



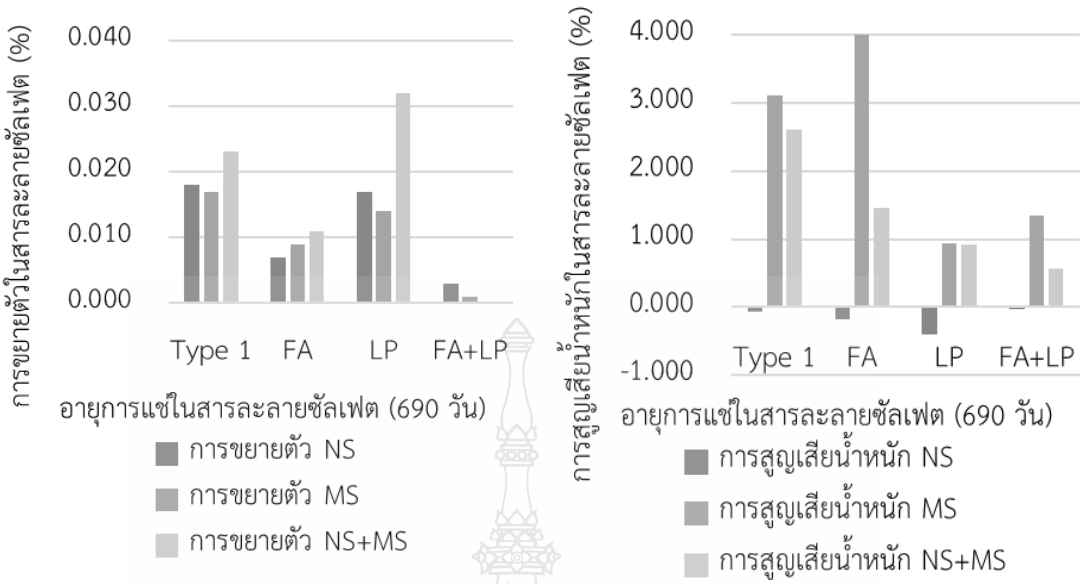
รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย เถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55

จากตารางที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานซัลเฟตเมื่อพิจารณาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ โดยเทียบสารละลายโซเดียมซัลเฟต (NS) จะพบว่า การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะให้ค่ามากที่สุด ถัดมาเป็นสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ตามลำดับ มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย และผงหินปูนให้ค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูน และเถ้าลอยที่ปริมาณน้อย (ที่มีค่า CaO สูง) จะมีค่าการขยายตัวที่มากกว่าหรือใกล้เคียง มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต มอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนจะให้ค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ในขณะมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยจะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบผลกระทบของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานซัลเฟตเมื่อพิจารณาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์โดยเทียบสารละลายโซเดียมซัลเฟต (NS)

ชนิดวัสดุประสาน	การขยายตัว	การสูญเสียน้ำหนัก
	MS	MS
Type 1	ใกล้เคียง	แย่กว่า
FA	ใกล้เคียง	แย่กว่า
LP	แย่กว่า	แย่กว่า
FA+LP	ใกล้เคียง	แย่กว่า
Type 5	แย่กว่า	แย่กว่า
FA	ใกล้เคียง	แย่กว่า
LP	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง
FA+LP	ใกล้เคียง	แย่กว่า

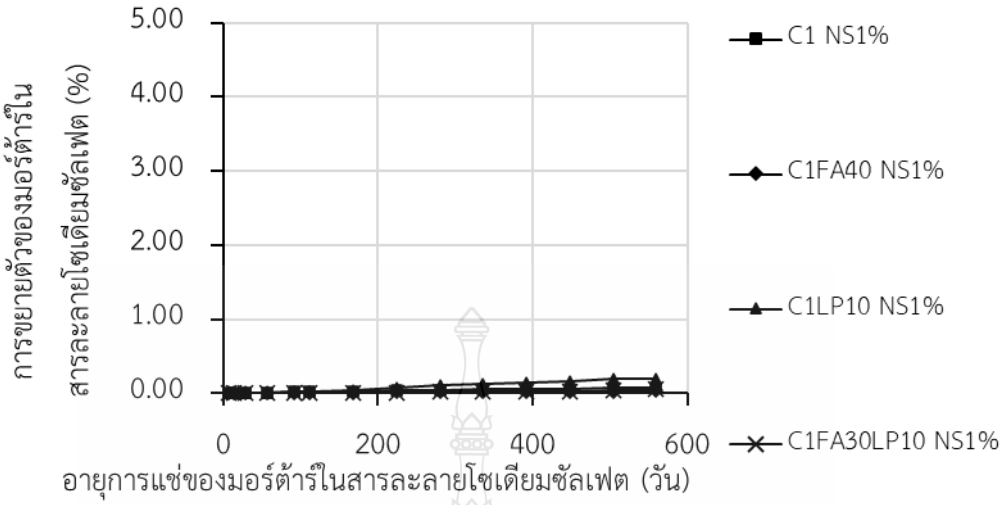
จากการศึกษากลไกการทำลายคอนกรีตโดยซัลเฟต และผลกระทบที่มีต่อการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต เนื่องจากผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟต จะพบว่าการการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะให้ค่ามากที่สุด ถัดมาเป็นสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ตามลำดับ ส่วนการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้ค่ามากที่สุด ถัดมาเป็นสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟต ตามลำดับ สามารถสรุปได้ดังตาราง 4.13



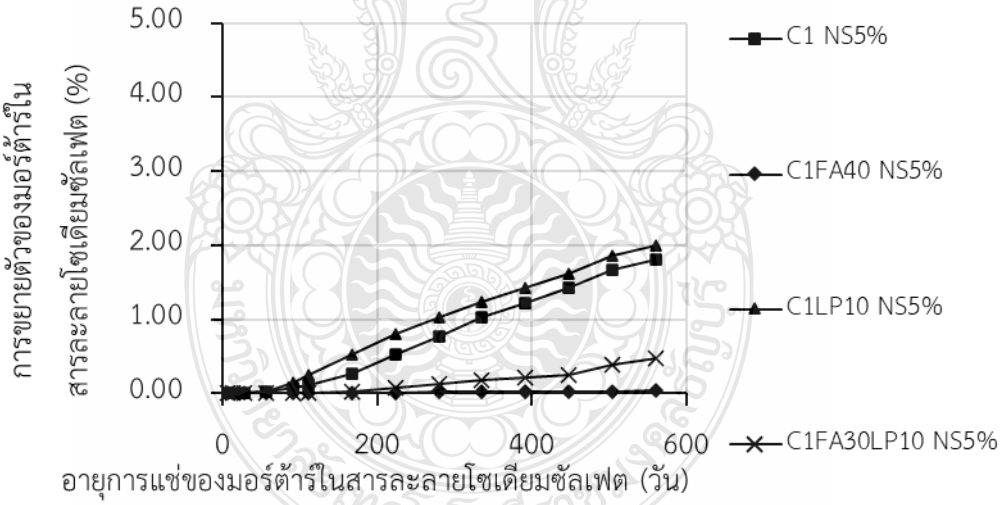
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ แทนที่ด้วยเถ้าลอย และ ผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55

4.3.3 ผลกระทบจากความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต

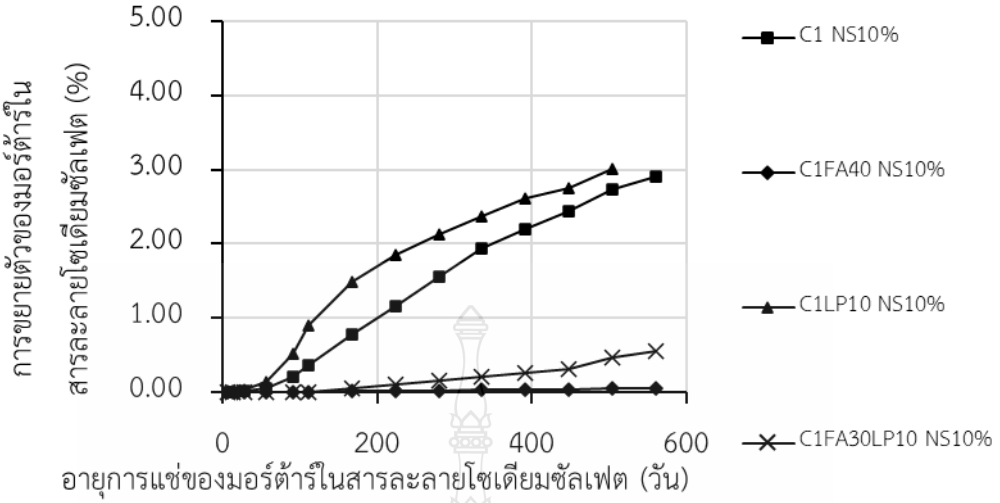
จากการศึกษาของ ปรีดา พันธุ์พงศ์ [11] เรื่องผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ สำหรับสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย 40 ผงหินปูน ร้อยละ 10 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ (W/B) เท่ากับ 0.55 สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ดังรูปที่ 4.42, รูปที่ 4.48



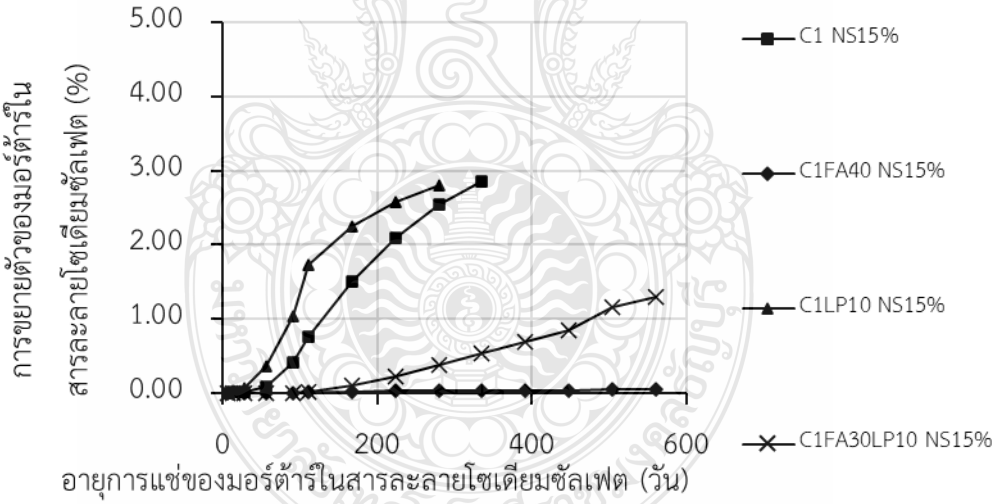
รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



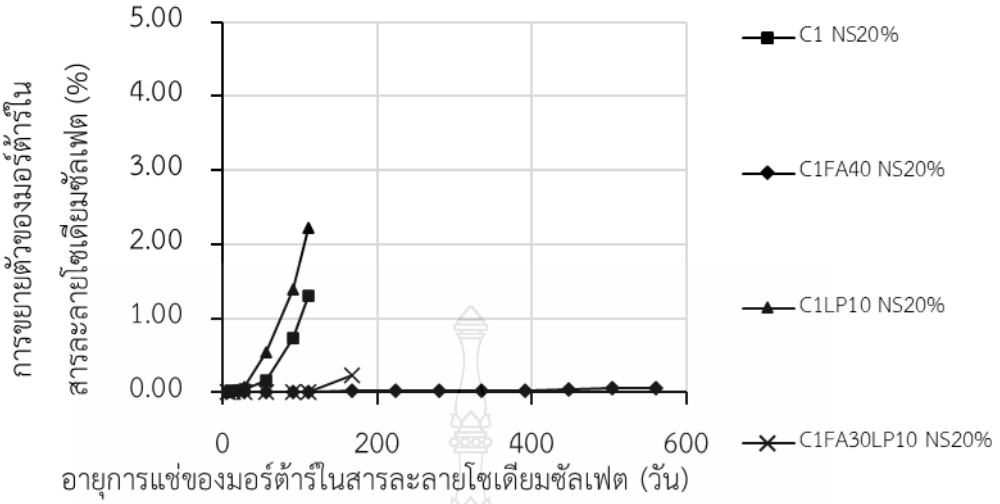
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



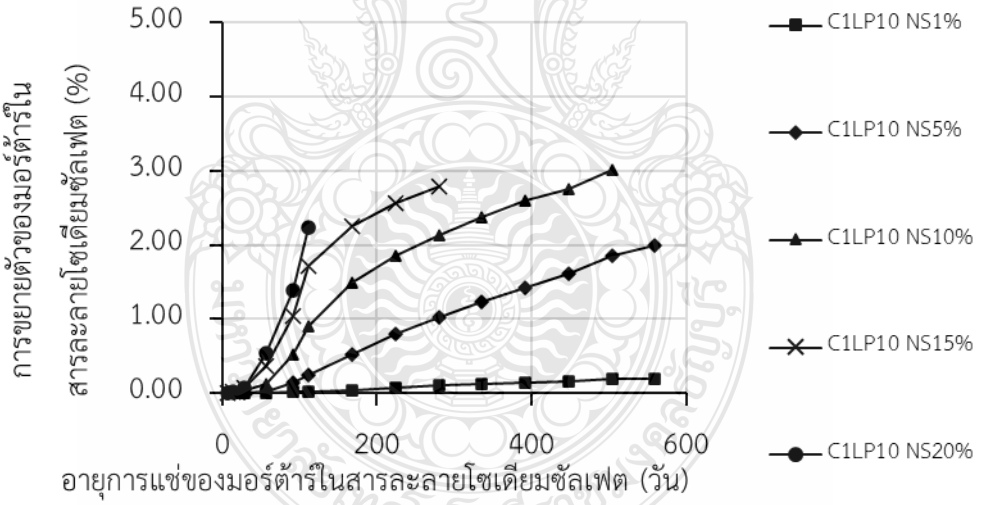
รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 10 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย เถ้าลอยและผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



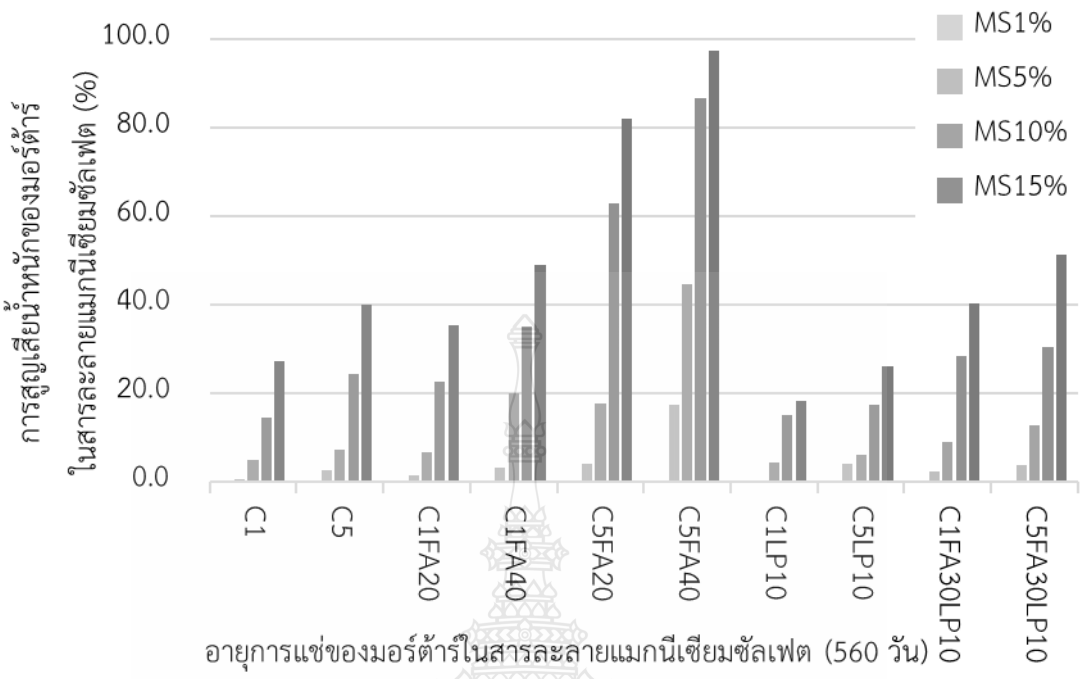
รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 15 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55



รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 15, 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55

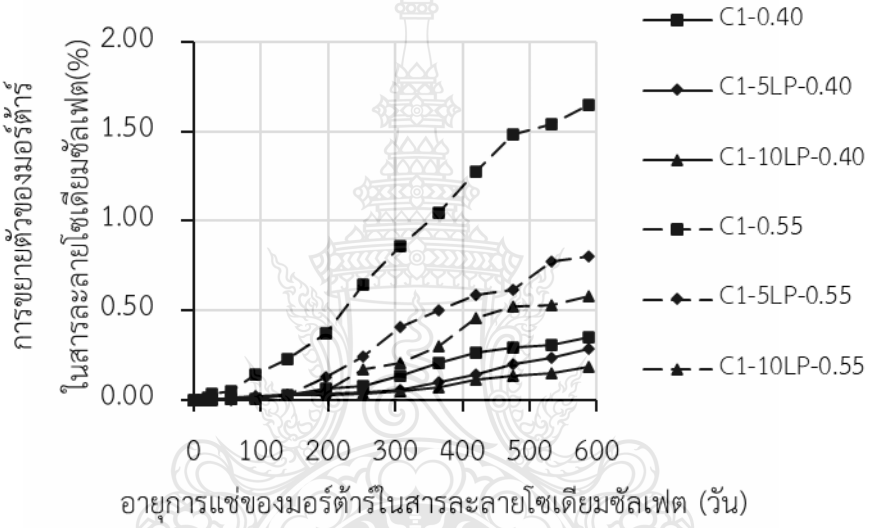


รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้น ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ 20 ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท ที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.55

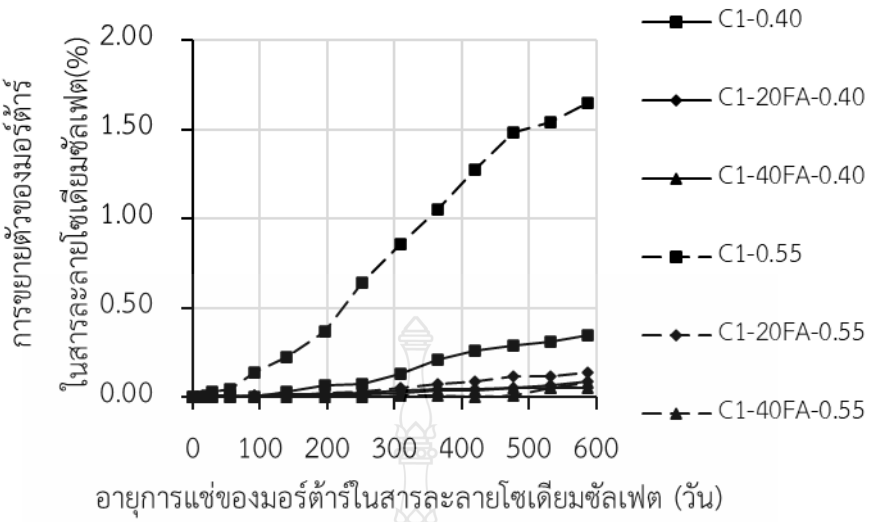
จากการศึกษากลไกการทำลายคอนกรีตโดยซัลเฟต และผลกระทบที่มีต่อการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต เนื่องจากผลกระทบจากความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต พบว่า ในกรณีเมื่อสารละลายซัลเฟตที่มีค่าความเข้มข้นร้อยละ 1 นั้น ต้องใช้เวลาที่นานกว่าจะเห็นผลของการประเมินการต้านทานซัลเฟตของตัวอย่าง ส่วนในกรณีสารละลายซัลเฟตที่มีค่าความเข้มข้นร้อยละ 5 สามารถใช้ในการประเมินการต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างได้อย่างเหมาะสม ซึ่งได้ใช้ตามมาตรฐาน ASTM อยู่แล้ว ส่วนในกรณีสารละลายซัลเฟตที่มีค่าความเข้มข้นร้อยละ 10 นั้น ก็น่าจะใช้ได้เช่นเดียวกับของความเข้มข้นร้อยละ 5 ส่วนในกรณีสารละลายซัลเฟตที่มีค่าความเข้มข้นร้อยละ 15 นั้น จะสังเกตว่าตัวอย่างจะถูกทำลายค่อนข้างเร็ว นั่นเป็นไปได้ว่าจะไม่เหมาะสมในการประเมินการต้านทานซัลเฟต ทั้งนี้เพราะตัวอย่างแต่ละสัดส่วนนั้นจะถูกทำลายไปพร้อมๆ กัน จะไม่สามารถประเมินความแตกต่างของการต้านทานซัลเฟตได้ โดยเฉพาะเมื่อความเข้มข้นที่มากกว่า อย่างเช่นในกรณีความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตที่ร้อยละ 20 เป็นต้น

4.4.4 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

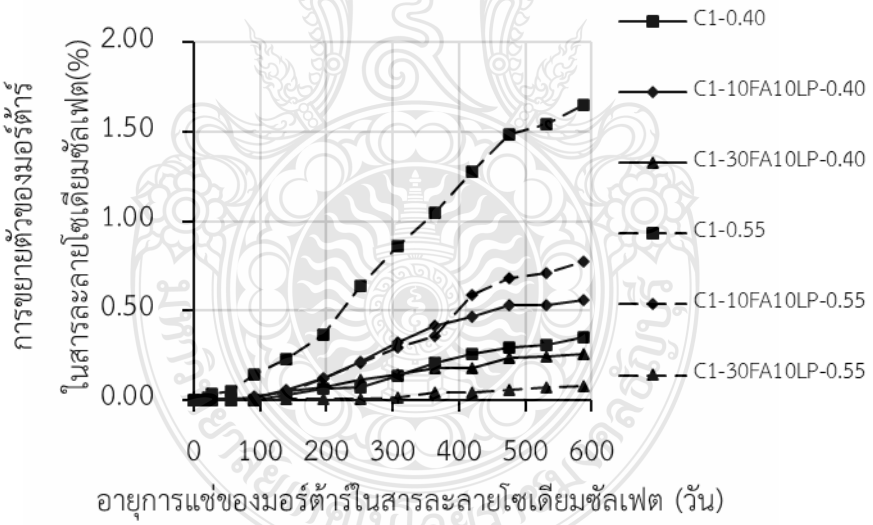
จากการศึกษาของ สุขชัย สุขยานุดิษฐ์ [12] เรื่องการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน สำหรับสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย ร้อยละ 20 และ 40 ฝุ่นหินปูน ร้อยละ 5 และ 10 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ (W/B) เท่ากับ 0.44 และ 0.55 สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น ร้อยละ 5 ดังรูปที่ 4.49, ถึง รูปที่ 4.55



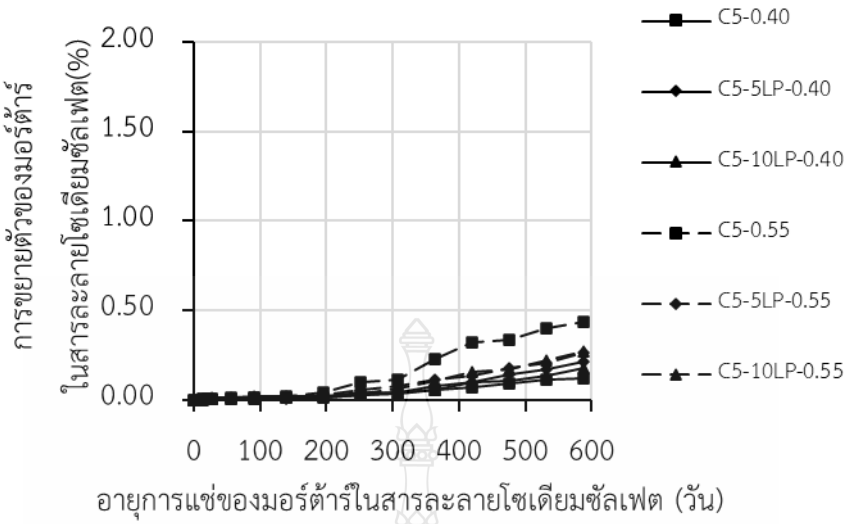
รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40 และ 0.55



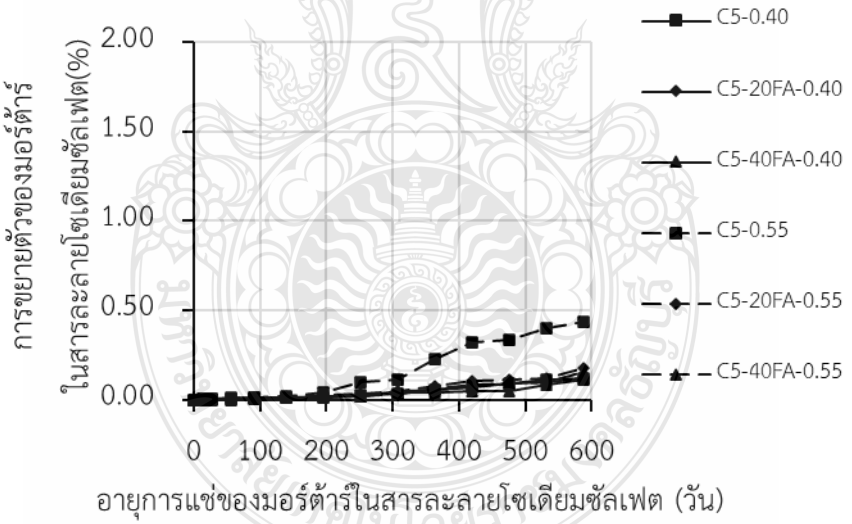
รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40 และ 0.55



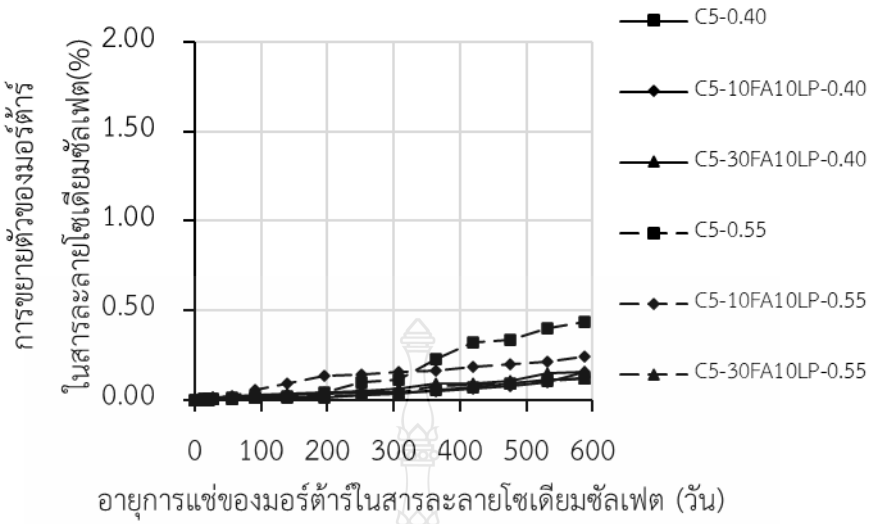
รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยผสมผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40 และ 0.55



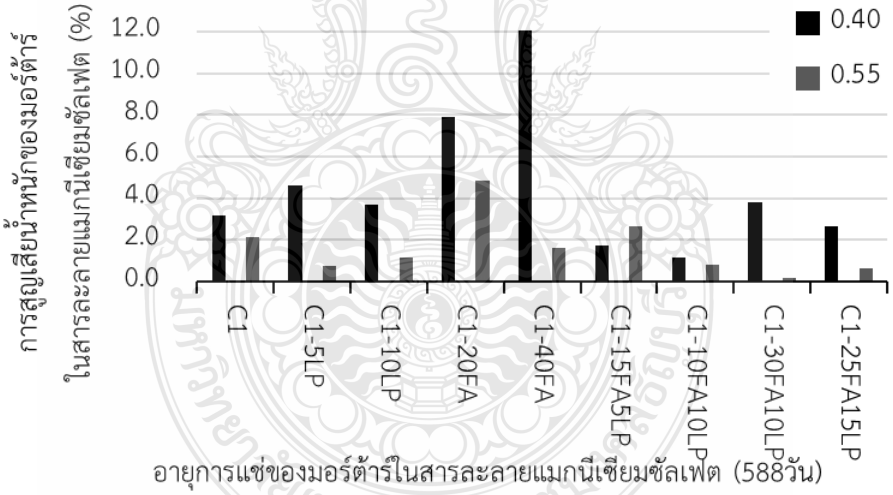
รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40 และ 0.55



รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40 และ 0.55



รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยผสมผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40 และ 0.55

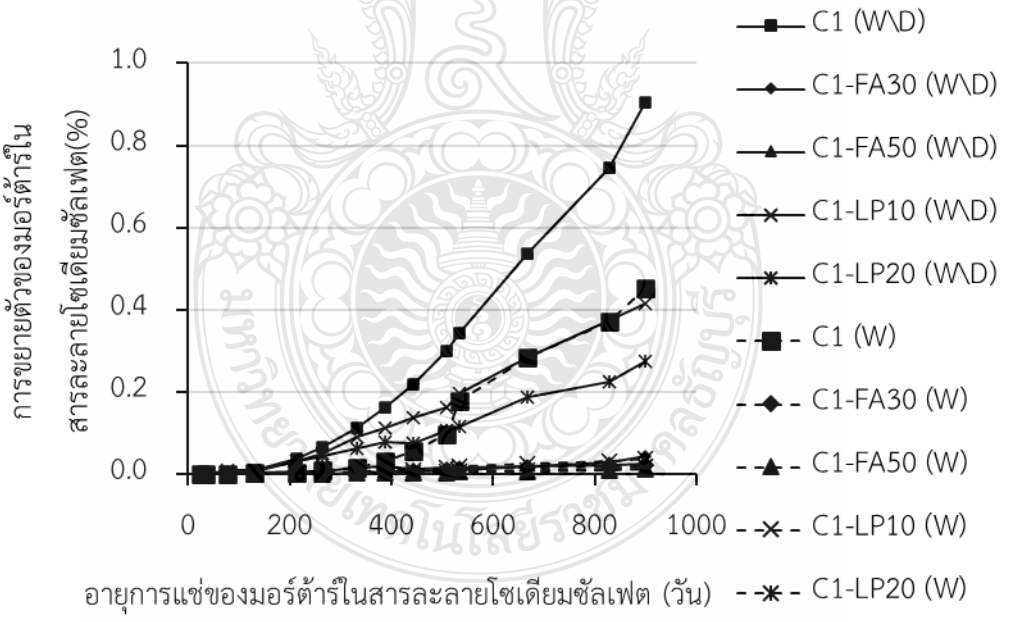


รูปที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40 และ 0.55

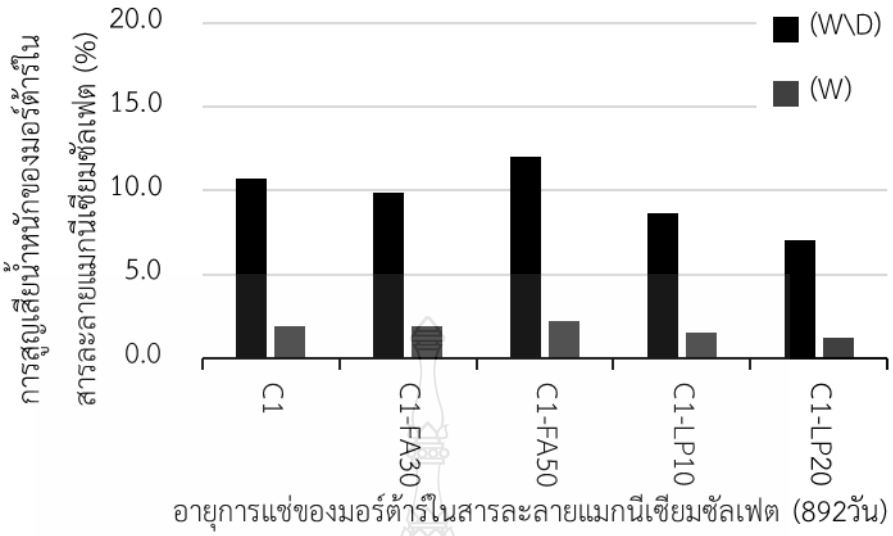
จากการศึกษากลไกการทำลายคอนกรีตโดยซัลเฟต และผลกระทบที่มีต่อการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต เนื่องจากผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน จะพบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ตัวอย่างในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีค่าน้อยกว่าจะมีการขยายตัวน้อยกว่าในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีค่ามากกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานในปริมาณที่มาก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะไม่มีผลกระทบ เนื่องจากการต้านทานซัลเฟตมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน

4.4.5 ผลกระทบจากสภาวะเปียกสลับแห้ง

จากการศึกษาของ กิตติศักดิ์ ล้วนวานิช [12] เรื่องการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักและการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตภายใต้สภาวะเปียกตลอดเวลาและเปียกสลับแห้ง สำหรับสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ร้อยละ 30 และ 50 ฝุ่นหินปูน ร้อยละ 10 และ 20 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ (W/B) เท่ากับ 0.40 สารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น ร้อยละ 5 โดยสลับสภาวะเปียกและแห้งเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.56, รูปที่ 4.57



รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน โดยอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง (W\D) และเปียกตลอด (W)



รูปที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน โดยอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง (W\D) และเปียกตลอด (W)

จากการศึกษากลไกการทำลายคอนกรีตโดยซัลเฟต และผลกระทบที่มีต่อการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต เนื่องจากผลกระทบจากสถาวะเปียกสลับแห้ง จะพบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ตัวอย่างในสภาวะเปียกสลับแห้งมีค่ามากกว่าในสภาวะเปียกตลอดเวลา ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ตัวอย่างในสภาวะเปียกสลับแห้งมีค่ามากกว่าในสภาวะเปียกตลอดเวลา สามารถสรุปได้ดังตาราง 4.14

ตารางที่ 4.13 ผลการศึกษาการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักจากผลกระทบจากสภาวะเปียกสลับแห้งต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะเปียกตลอดเวลา

ชนิดของวัสดุประสาน	การขยายตัว	การสูญเสียน้ำหนัก
	เปียกสลับแห้ง	เปียกสลับแห้ง
Type 1	แย่กว่า	แย่กว่า
FA	แย่กว่า	แย่กว่า
LP	แย่กว่า	แย่กว่า
FA+LP	แย่กว่า	แย่กว่า

4.4 การพัฒนาคอนกรีตเพื่อเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมซัลเฟต

จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปผลการเปรียบเทียบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต เพื่อเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมซัลเฟต จะพบว่าคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอย (ร้อยละ 30) และ ผงหินปูน (ร้อยละ 10) ให้ค่าการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทั้งในสาระละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) โดยน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 0.40

ตารางที่ 4.14 สรุปผลการเปรียบเทียบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต เนื่องจากผลกระทบที่มีต่อการทำลายคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5

ชนิดวัสดุประสาน		การขยายตัว			การสูญเสียน้ำหนัก			ความต้านทานซัลเฟตโดยรวม
		NS	MS	NS+MS	NS	MS	NS+MS	
Type 1	FA	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	แย่กว่า	แย่กว่า	แย่กว่า	แย่กว่า
	LP	เทียบเท่า	เทียบเท่า	เทียบเท่า	เทียบเท่า	ดีกว่า	ดีกว่า	เทียบเท่า
	SL	ดีกว่า	แย่กว่า	แย่กว่า	แย่กว่า	แย่กว่า	แย่กว่า	แย่กว่า
	SF	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	เทียบเท่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	FA+LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	SL+LP	ดีกว่า	แย่กว่า	แย่กว่า	แย่กว่า	แย่กว่า	แย่กว่า	แย่กว่า
	SF+LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
Type 5	FA	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	แย่กว่า	แย่กว่า	แย่กว่า	แย่กว่า
	LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	เทียบเท่า	ดีกว่า
	SL	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	SF	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	FA+LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า
	SL+LP	เทียบเท่า	ดีกว่า	ดีกว่า	แย่กว่า	แย่กว่า	แย่กว่า	แย่กว่า
	SF+LP	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า

บทที่ 5
สรุป

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) กลไกการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟตขึ้นอยู่กับการเกิด Secondary Ettringite ซึ่งมีเสถียรภาพ ทำให้การขยายตัวมีมากขึ้น ในขณะที่กลไกในการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตนั้นเป็นการเปลี่ยน C-S-H เป็น M-S-H ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสานเลย ทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของผิวซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว และเกิดการสะสมของยิปซั่มและ Brucite โดยที่ไม่เกิดการขยายตัวมากเหมือนกรณีการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟต

2) ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตสามารถประเมินการต้านทานซัลเฟตโดยวิธีการวัดการขยายตัว ในขณะที่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต จะต้องประเมินการต้านทานซัลเฟตการขยายตัวควบคู่กับการสูญเสียน้ำหนัก หรือควบคู่กับการสูญเสียปริมาตร

3) สามารถเลือกใช้วัสดุประสานของคอนกรีต ชนิดของสารละลายซัลเฟต ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และสภาวะเปียกสลับแห้งของสารละลายซัลเฟต ให้เหมาะสมกับคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

4) สามารถเลือกใช้สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่เหมาะสมเมื่อคอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

บรรณานุกรม

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

[2] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 2 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าธนบุรี

[3] อภิชา หนูพันธ์. (2557). **การต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา.** (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).

[4] ยงยุทธ วัฒนกุล. (2554). **คุณสมบัติด้านซีเมนต์และความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน.** (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).

[5] นรากร สุดงทำนอง. (2557). **เรื่องความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด.** (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).

[6] นพคุณ ผลโพธิ์ (2554). **เรื่องผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์.** (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).

[7] สุรพงศ์ หมวกนาค. (2555). **เรื่องความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายซัลเฟต.** (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).

[8] ชัยณรงค์ เรื่องเลือ. (2551). **เรื่องการขยายตัวของมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในสารละลายซัลเฟต.ซัลเฟต.** (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).

[9] ปรีดา พันธุ์พงศ์. (2557). **เรื่องผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์.** (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).

บรรณานุกรม(ต่อ)

[10] เอกราช จำนงค์รัตน์. (2560). **เรื่องสมบัติเบื้องต้นและการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก.** (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).

[11] สุขชัย สุขยานุดิษฐ์. (2554). **เรื่องการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นหินปูน.** (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).

[12] กิตติศักดิ์ ล้วนวานิช. (2555). **เรื่องการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักและการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตภายใต้สภาวะเปียกตลอดเวลาและเปียกสลับแห้ง.** (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

TCA
สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
Thailand Concrete Association
SIRDC
การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15
การพัฒนาเทคโนโลยีคอนกรีต
สำหรับโครงการ EEC
25-26-27 มีนาคม 2563
ANNUAL CONCRETE CONFERENCE 15
จัดโดย สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
ร่วมกับ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ

การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15

Annual Concrete Conference 15 (ACC15)

บทความ

- บทความโดยองค์ปาฐก (Keynote)
- บทความวิจัยรับเชิญ (IVT)
- บทความวิจัย สาขาคอนกรีตและวัสดุ (MAT)
- บทความวิจัย สาขาโครงสร้างคอนกรีต (STR)
- บทความวิจัย สาขาบำรุงรักษา ซ่อมแซม และเสริมกำลังคอนกรีต (REP)
- บทความวิจัยสาขาคอนกรีตเพื่อสิ่งแวดล้อมและการอนุรักษ์พลังงาน (ENV)
- บทความวิจัย สาขาการปรับปรุงคุณสมบัติของดินด้วยวัสดุซีเมนต์ (GTE)
- บทความวิจัย สาขาผลงานและนวัตกรรมงานคอนกรีตของผู้ประกอบการ (ICM)

25-27 มีนาคม 2563

โรงแรมระยองรีสอร์ท

อำเภอบ้านเพ จังหวัดระยอง

จัดทำโดย

- สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

ร่วมกับ

- สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สงวนลิขสิทธิ์ © ตาม พรบ.ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2521 โดยสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2563 จำนวน 150 เล่ม

คำนำ

การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15 เป็นความร่วมมือทางวิชาการระหว่าง สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท.) วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา และ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น จัดขึ้นระหว่างวันที่ 25-27 มีนาคม 2563 ณ โรงแรมระยองรีสอร์ท อำเภอบ้านเพ จังหวัดระยอง ภายใต้หัวข้อ ***"การพัฒนาเทคโนโลยีคอนกรีตสำหรับโครงการ EEC"*** โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เป็นเวทีในการเผยแพร่ความรู้ นำเสนองานวิจัย และแสดงความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีคอนกรีตของประเทศ เพื่อมุ่งพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของประเทศและ EEC และให้นักวิชาการ อาจารย์ นักวิจัย นิสิต วิศวกร ผู้ประกอบการ รวมถึงผู้ปฏิบัติงานด้านคอนกรีตได้ทราบถึงเทคโนโลยีใหม่เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสมต่อไป

ในการประชุมครั้งนี้สมาคมฯ ได้รับเกียรติวิทยากรจากหน่วยงานภาครัฐ บริษัทเอกชน และบริษัทก่อสร้างที่สำคัญในประเทศที่มีการทำงานที่เกี่ยวข้องกับงานด้านคอนกรีตและมอร์ตาร์ซึ่งเชื่อว่าผู้เข้าร่วมประชุมจะได้รับประโยชน์จากการประชุมครั้งนี้อย่างมาก นอกเหนือจากการนำเสนอเนื้อหาของงานวิจัยทางด้านคอนกรีตและวัสดุก่อสร้างที่มีการใช้ปูนซีเมนต์ สุดท้ายแล้วยังมีการนำเสนองานที่น่าสนใจที่ได้รับรางวัล TCA Concrete Practice award รวมนำเสนอผลงานก่อสร้างภายในงานดังกล่าว

ในฐานะของคณะผู้จัดการประชุมครั้งนี้ ขอขอบคุณ องค์ปาฐกรับเชิญวิทยากรรับเชิญ ผู้เขียนบทความ ผู้นำเสนอบทความ ผู้เข้าร่วมประชุม บริษัทและห้างร้านต่างๆ ที่ได้สนับสนุนการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 15 เป็นอย่างดียิ่ง ทำให้การประชุมครั้งนี้ ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

- **สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา**
- **ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น**
- **สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย**

สารบัญ

	หน้า
คณะกรรมการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย	2
คณะกรรมการวิชาการและกรรมการสมทบ สาขาโครงสร้างคอนกรีต	3
คณะกรรมการวิชาการและกรรมการสมทบ สาขาคอนกรีต วัสดุและการก่อสร้าง	4
คณะกรรมการวิชาการและกรรมการสมทบ สาขาบำรุงรักษา ซ่อมแซม และเสริมกำลังคอนกรีต	6
คณะกรรมการกลุ่มมอร์ตาร์	7
สำนักเลขาธิการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย	8
คณะทำงานฝ่ายประชาสัมพันธ์ และสื่อสารองค์กร	8
คณะกรรมการอำนวยการจัดประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยพะเยา	9
คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15	9
กำหนดการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15	11
สารบัญบทความ	18
ผู้สนับสนุน	401

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

กำหนดการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15
The 15th Annual Concrete Conference (ACC15)
(Interactive Online Conference)
วันที่ 25-27 มีนาคม พ.ศ. 2563

วันที่ 25 มีนาคม พ.ศ. 2563 [March 25, 2020]

พิธีเปิดการประชุมวิชาการ
ห้องที่ 1(ชื่อเดิม Rayong Grand Ballroom)

ผู้ดำเนินรายการ: *รศ.ดร.วีรชาติ ตั้งจิรภัทร*

13.00–13.30 น.	กล่าวต้อนรับผู้เข้าร่วมการประชุมและกล่าวขอบคุณผู้สนับสนุนการจัดการประชุม มอบรางวัล TCA Concrete Practice Awards (Opening ACC15) *โดยนายกสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (President of TCA)* พิธีเปิดการประชุมและกล่าวขอบคุณผู้สนับสนุน *โดยคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยาหรือผู้แทน*
13.45น. เป็นต้นไป	**การบรรยายพิเศษ(Keynote Speaker)**ห้องที่ 1(Rayong Grand Ballroom) **"Development of Concrete Technology for Eastern Economic Corridor"**

ประธานภาค : *รศ.ดร.วีรชาติ ตั้งจิรภัทร*

13.45 – 14.45น.	*"การทำนายพฤติกรรมคอนกรีตเพื่อการประยุกต์ใช้งานและจัดทำมาตรฐาน (Modeling of Concrete Behavior for Applications and Standard Establishment)"* *โดย ศ.ดร. สมนึก ตั้งเติมสิริกุล*
14.45 – 15.45น.	นำเสนอผลงาน TCA Concrete Practice Awards(Gold Medal) โครงการ Rose Wood Hotel Project *โดย ดร.อัศวิน วาณิชย์ก่อกุล,Aurecon Consulting (Thailand) Co.,Ltd.*
15.45 – 16.00น.	พักการบรรยาย
16.00 – 16.30 น.	บทความรับเชิญ เรื่อง "บริบทคอนกรีตกับงานก่อสร้าง ภายใต้สมาคมซีเมนต์และคอนกรีตโลก (Global Concrete and Cement Association, GCCA)" *โดยคุณณัฐวุฒิ อินทรส Co-chairman Future of Construction, GCCA*
16.30 – 17.00น.	16th International Congress on the Chemistry of Cement, ICCC 2023 in Bangkok Thailand
17:00-17:30 น.	แนะนำเจ้าภาพ ACC16มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วันที่ 26 มีนาคม พ.ศ. 2563 [March 26, 2020]

08.30 – 10.15 น. **หัวข้อบรรยายพิเศษ** ห้องที่ 1 (ชื่อเดิม Rayong Grand Ballroom)
"Development of ConstructionTechnology for EEC's Infrastructure"

ประธานภาค : *ผศ.ดร.ชูชัย สุจิวรกุล*

08.30– 08.55 น. *"Non Sludge and High Strength Technology for Spun Pile Production"*
โดย Mr. Thanakit Kittimongkol (R&D, Infrastructure Business, KAO)

08.55–09.20 น. *"Admixture to Improve RC Segment Production with Thickening Control Technology"*
โดย Mr. Anuwat Poontavorn (R&D Manager, Infrastructure Business, KAO)

09.20 – 09.45 น. *"Investigation of Heat Transfer Behavior and Sound Insulation Relating to Biomimicry Design of 3D Printing Panel"*
โดย Mr.Kittisak Pongpaisanseree, SCG

09.45 – 10.10 น. *"การประเมินความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟความเร็วสูงบนสะพานด้วยวิธีการทดสอบและการวิเคราะห์แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟและสะพาน: กรณีศึกษาโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงค์*(Running Safety Assesment of High Speed Train Over a Viaduct via Experiment and Bridge-Train Dynamic Interaction Simulation: A Case Study of Thailand Airport Rail Link Project)"
โดย ผศ.ดร.รัฐภูมิ ปริชาติปรีชา, มหาวิทยาลัยนเรศวร

วันที่ 26 มีนาคม พ.ศ. 2563 [March 26, 2020]

08.30 – 10.15 น.การนำเสนอบทความวิจัย ห้องที่ 2 (ชื่อเดิม Banphe Grand Ballroom)
ประธานภาค : *ผศ.ดร.เกียรติสุดา สมนา*
รองประธานภาค : *รศ.ดร.ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ*

MAT-001	การตรวจสอบรอยร้าวบนพื้นผิวคอนกรีตในรูปแบบมัลติสเกลโดยการประมวลผลภาพ *Piyawat Tonsrisakul*
MAT-003	สมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด *Sathit Larpthaikam*
MAT-004	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้วัสดุประสานต่างชนิดกันและเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย *Chanawit koedsri*
MAT-005	การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียก *Naragon Sudthamnong*
MAT-006	ความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก *Ditthawat Dangchum*

MAT-007	การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ผลิตจากการกระตุ้นวัสดุเหลือใช้ในงานอุตสาหกรรมด้วยอัลคาไลน์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมผิวทาง *ธนกฤต เทพอุโมงค์*
MAT-008	ผลกระทบของความละเอียดผงหินปูนต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตและการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ *Surasit Pohboon*

8.30 – 10.15 น.การนำเสนอบทความวิจัยห้องที่ 3 (ชื่อเดิม Samet Room)

ประธานภาค : *ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ มกระธัช*

ICM-002	นวัตกรรมคอนกรีตเบาเซลล์กรีต *อภัย ชาภิรมย์, ธีรวัฒน์สินศิริ*
ICM-004	Rheological property of cement containing supplementary cementitious material *THANAKRIT CHANTRA*
ICM-005	A direct test method to assess pozzolanic activity of fly ash for concrete *Pornwit Anansup*
ICM-006	ปูนซีเมนต์สำหรับงานคอนกรีตไม่อัดแรง *Teepakorn Napharatsamee*
ICM-007	การใช้หลักการสร้างแบบจา ลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับทำนายความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีต *Oraya Assawanawachart*
ICM-008	Natural Rubber Powder for Construction Applications *Nanticha Kalapat*
ICM-009	Non-shrink grout *Phattarakamon Chaiyapoom*
GTE-002	COMPRESSIVE STRENGTH OF RECYCLED BASED MATERIALS IMPROVED BY POLYVINYLALCOHOL AND CEMENT *Chaiwat waree*

10.15 – 10.30 น. พักการบรรยาย

10.30 – 12.15 น. การนำเสนอบทความวิจัย ห้องที่ 1 (ชื่อเดิม Rayong Grand Ballroom)

ประธานภาค :*รศ.ดร.วันชัย ยอดสุดใจ*

MAT-009	INFLUENCES OF FINE AGGREGATE TYPES AND CONTENTS ON COMPRESSIVE STRENGTH AND RADIATION SEIELDING OF CONCRETE *Saranyoo Srirach*
MAT-010	การศึกษาเบื้องต้นการประยุกต์ใช้แผ่น viscoelastic polymer ในการปรับปรุงคุณสมบัติการสั่นสะเทือนและเสียงในแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ *Jirawin Sanguansin*
MAT-011	EFFECT OF GRAPHENE OXIDE ON BOND STRENGTH OF STEEL FIBER *Suriyawan Kongtun*
MAT-012	THE EFFECT OF GRAPHENE OXIDE IN BOND STRENGTH OF SYNTHETIC FIBERS *Apisit Techaphatthanakon*

MAT-015	ผลกระทบของโซเดียมพอลิอะคริเลตต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตภายใต้อุณหภูมิสูง *Chalisa Intamat*

10.30 – 12.15 น. การนำเสนอบทความวิจัย ห้องที่ 2 (ชื่อเดิม Banphe Grand Ballroom)

ประธานภาค : *ผศ.ดร.รัฐพล สมนา*

รองประธานภาค : *รศ.ดร.ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ*

STR-002	พฤติกรรมและการเสริมกำลังโครงสร้างเจดีย์ในจังหวัดพะเยา *Akarachai Jaima*
STR-003	TESTING OF EFFICIENCY OF CONCRETE-FILLED STEEL SQUARE TUBE COLUMNS AFTER EXPOSURE TO ELEVATED TEMPERATURES *Apichat Tipcharoen*
STR-004	SURVEY ON CARBONATION RATE OF RC BUILDING STRUCTURESIN COMMUNITY AREA OF UDON THANI PROVINCE *Apisit Parnvad, ปิติศานต์ กร้ำมาตร , Pinyo Poyen*
MAT-016	อิทธิพลของโพลิเมอร์ต่อกำลังอัดของดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ *กฤษณะพัฒน์ เจนปิยพงศ์*
MAT-017	USE OF GEOPOLYMER MORTAR AS REPAIR MATERAIL CONCRETE EXPOSE MAGNESIUM SUNFATE *BOONLERT SRIOPAS*
MAT-035	อิทธิพลของวัสดุพอลิเมอร์ที่มีต่อคุณสมบัติการดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว Chuchai Sujivorakul, Jiraporn Jaratguy, Namfon Kanin

10.30 – 12.15 น. การนำเสนอบทความวิจัยห้องที่ 3(ชื่อเดิม Samet Room)

ประธานภาค : *ผศ.ดร.รักศิพงษ์ สหมิตรมงคล*

MAT-018	EFFECTS OF FLY ASH AND EXPANSIVE ADDITIVE ON SHRINKAGE CRACKING AND CHLORIDE PENETRATION RESISTANCES OF CONCRETE *Warangkana Saengsoy*
MAT-019	Comparison of water permeability between laboratory test and in place test for pervious concrete *Mano Promde*
MAT-022	การเปรียบเทียบระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในคอนกรีตกำลังปกติและคอนกรีตกำลังต่ำ *ภูวดล ใยยินดี, ชิชญาสุ์ บุญมี, Kittipoom Rodsin*
MAT-024	เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าถ่านหินจีโอโพลิเมอร์ที่กระตุ้นด้วยอุณหภูมิสูง *ประชุม คำพุฒ, เกียรติสุดา สมนา, rattapon somna*
MAT-025	Effects of Expansive Additive on Setting Time and Compressive Strength of Alkali-Activated High-Calcium Fly Ash *Sakonwan Hanjitsuwan, Borwonrak Injorhor, Nattawat Sohsungnoen, Tanisorn sohsungnoen, Phattarapol Chanwanna, Akaraphol Wachum, Chattarika Phiangphimai, Tanakorn Phoo-ngernkham*

MAT-037	INFLUENCE OF BURNISHING PROCESS ON SURFACE HARDNESS AND ABRASION RESISTANCE OF CONCRETE WITH DIFFERENT TYPES OF BINDER *Udom Kong, Narongchai Phuangkong, Raktipong Sahamitmongkol*

12.15 – 13.15 น. พักการบรรยาย

วันที่ 26 มีนาคม พ.ศ. 2563 [March 26, 2020]

13.30 - 15.30 น. **ชมการบรรยายพิเศษและการสาธิตผลิตภัณฑ์ของงานคอนกรีตและมอร์ตาร์**
ห้องที่ 1 (ชื่อเดิม Rayong Grand Ballroom)

ประธานภาค : *น.อ.รศ.ดร.ธนากร พีระพันธุ์*

13.30 – 14.00 น. การสาธิตผลิตภัณฑ์ของบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

14.00 – 14.30 น. การสาธิตผลิตภัณฑ์ของบริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด

14.30 – 15.00 น. การสาธิตผลิตภัณฑ์ของบริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน)

15.00– 15.30 น. แนะนำConcrete Asia 2020 ของ บริษัท IMPACT Exhibition Management จำกัด

วันที่ 27 มีนาคม พ.ศ. 2563 [March 27, 2020]

08.30 – 11.30 น. **การบรรยายพิเศษผลงานประกวด TCA Concrete Practice Award**
ห้องที่ 1 (ชื่อเดิม Rayong Grand Ballroom)

ประธานภาค : *ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ มกระธัช*

08.30 – 09.00 *"การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของโครงการไฟฟ้าพลังน้ำไชยะบุรี"*
โดย บริษัท ช.การช่าง(ลาว) จำกัด(มหาชน), TCA Silver Medal

09.00 - 09.30 น. *"CPAC High Strength Concrete First Concrete Grade 80 MPa Supplied for Commercial Building in Thailand"*
โดย บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด, TCA Silver Medal

09.30 – 10.00น. *"การก่อสร้างระบบพื้นแบบกลวงรับแรงสองทาง (BIAXIAL SLAB) ของอาคารสำนักงาน T-ONE BUILDING"*
โดย บริษัท เจนเนอรัล เอนจิเนียริ่ง จำกัด (มหาชน), TCA Concrete PracticeAward

15

10.00 – 10.30 น. *"การก่อสร้างฐานรากด้วยเสาเข็มสปัน (Spun pile) และระบบตอกตั้งเสาเข็มเจาะสำเร็จรูป (Double rod auger) โครงการ The Uppergrounds"*
โดย บริษัท เจนเนอรัล เอนจิเนียริ่ง จำกัด (มหาชน), TCA Concrete PracticeAward

10.30 – 11.00 น. *"คอนกรีตสำหรับงานฐานรากและกำแพงกันดินระดับลึกมาก (Tremie concrete for very deep foundation and retaining wall)"*
โดย ดร. ธยานันท์ บุณยรักษ์,
ผู้อำนวยการฝ่ายวิศวกรรม, บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน)

วันที่ 27 มีนาคม 2563 [March 27, 2020]

08.30 – 11.30 น. การนำเสนอบทความวิจัย ห้องที่ 2 (ชื่อเดิม Banphe Grand Ballroom)
ประธานภาค : *ผศ.ดร.ภานุวัฒน์ จ้อยกลัด*

MAT-026	Compressive Strength of Concrete with Recycled Asphalt Pavement Aggregates under Tropical Temperatures *Jirayut Suebsuk*
MAT-027	Effect of Temperatures on Compressive Strength and Microstructure of Cement Mortar with Recycled Asphalt Pavement Aggregates *Jirayut Suebsuk*
MAT-028	Factors of Na2SiO3/NaOH Ratio and Portland Cement Content on Setting time,Compressive and Slant Shear Strengths of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Mortar *Chirdsakul Lathulee, Thawatchai Sarachot, Sirichai Chobrak, Natthasin Wichit, Khattiya Chompoovong, Chudapak Detphan, ศตคุณ เดชพันธุ์, Tanakorn Phoo-ngernkham*
MAT-029	Workability, Strength and Chloride Diffusion Coefficient of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Mortar Incorporated with Silica Fume *Akaraphol Wachum, Siriwat Woravong, Songwut Kloaram, Mongkhon Phonsen, Chattarika Phiangphimai, สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์, Nattapong Damrongwiriyanupap, Tanakorn Phoo-ngernkham*
MAT-030	Development of Alkali-Activated Material Made From High-Calcium Fly Ash Containing Limestone Powder as Rendering Mortar *Tanakorn Phoo-ngernkham, Chattarika Phiangphimai, Sawat Guankrathok, Chudapak Detphan, Khattiya Chompoovong, ศตคุณ เดชพันธุ์, สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์, Piti Sukontasukkul*
MAT-031	ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF REINFORCING STEEL CORRODED BY CARBONATION *Sothyrak Rath, Pakawat Sancharoen*
MAT-032	Effects of High Volume of Bottom Ash on Compressive Strength and Modulus of Elasticity of High Strength Recycled Aggregate Concrete *Nakarin Nakararoj, Weerachart Tangchirapat , Chai Jaturapitakkul*

08.30 – 11.30 น. การนำเสนอบทความวิจัยห้องที่ 3(ซื่อเดิม Samet Room)

ประธานภาค : *ผศ.ดร.รุ่งโรจน์ ปิยะภานุวัฒน์*

รองประธานภาค : *ดร.ยุทธ ปณิธานวงศ์*

ENV-001	ผลกระทบของเถ้าชีวมวลที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพต่อสมรรถนะการไหลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและกำลังอัดของคอนกรีตชนิดอัดตัวแน่นได้เอง *Chaipak Suwachart*
MAT-033	INFLUENCES OF SODIUM HYDROXIDE SOLUTION AND CALCIUM CARBIDE RESIDUE TO FLY ASH RATIOS ON COMPRESSIVE STRENGTH AND ABRASION RESISTANCE OF ALKALI-ACTIVATED MORTAR *Puntana Suttiprapa, Weerachart Tangchirapat , Chai Jaturapitakkul*
MAT-034	Mechanical Properties of High Performance Concrete Using Ground Bottom Ash and Limestone Powder as a Cement Replacement *Piyanat Charoenamnuaysuk, Pakawat Pormmoon, Weerachart Tangchirapat , Anuwat Attachaiyawuth, Chai Jaturapitakkul*
MAT-036	ผลกระทบของซิลิกาฟูม เถ้าแกลบบด และเถ้าลอยต่อการพฤติกรรมการก่อตัว กำลังอัด และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในซีเมนต์เพสต์ *Mongkhon Narmluk, Phongphat Muleephan, Itinun Tesson, Thanakan Zatang*

11.30 –12.00น. ปิดการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15

สารบัญบทความ

การบรรยายพิเศษ (Keynote Speaker)		หน้า
Keynote-001	การทำนายพฤติกรรมคอนกรีตเพื่อการประยุกต์ใช้งานและจัดทำมาตรฐาน (Modeling of Concrete Behavior for Applications and Standard Establishment) *ศ.ดร.สมนึก ตั้งเติมสิริกุล*	24
Keynote-002	บริบทคอนกรีตกับงานก่อสร้าง ภายใต้สมาคมซีเมนต์และคอนกรีตโลก (Global Concrete and Cement Association, GCCA) *คุณณัฐวุฒิ อินทรส*	70

บทความวิจัย สาขาคอนกรีต วัสดุและการก่อสร้าง (MAT)		หน้า
MAT-001	การตรวจสอบรอยร้าวบนพื้นผิวคอนกรีตในรูปแบบมัลติสเกลโดยการประมวลผลภาพ *Piyawat Tonsrisakul*	79
MAT-003	สมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด *Sathit Larpthaikarn*	85
MAT-004	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้วัสดุประสานต่างชนิดกันและเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย *Chanawit koedsri*	93
MAT-005	การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียก *Naragon Sudthamnong*	102
MAT-006	ความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก *Ditthawat Dangchum*	111
MAT-007	การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ผลิตจากการกระตุ้นวัสดุเหลือใช้ในงานอุตสาหกรรมด้วยอัลคาไลน์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมผิวทาง *ธนกฤต เทพอุโมงค์*	118
MAT-008	ผลกระทบของความละเอียดผงหินปูนต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตและการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ *Surasit Pohboon*	124
MAT-009	INFLUENCES OF FINE AGGREGATE TYPES AND CONTENTS ON COMPRESSIVE STRENGTH AND RADIATION SEIELDING OF CONCRETE *Saranyoo Srirach*	132
MAT-010	การศึกษาเบื้องต้นการประยุกต์ใช้แผ่น viscoelastic polymer ในการปรับปรุงคุณสมบัติการสั่นสะเทือนและเสียงในแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ *Jirawin Sanguansin*	140

การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียก

EXPANSION IN SODIUM SULFATE SOLUTION OF MORTAR WITH WET FLY ASH

นรากร สุดทำนอง[1] (Naragon Sudthamnong)[1]
ปิติศานต์ กร้ำมาตร[2] (Pitisan Krammart)[2]
นิรชร นกแก้ว[3] (Nirachorn Nokkaew)[3]
เอกราช จำนงค์รัตน์[4] (Aekkarat Jumnongrat)[4]

[1]นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
Email: poy.nrgstn@gmail.com
[2,3]รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
Email: pitisan.k@en.rmutt.ac.th[2] *Email: nirachorn.n@en.rmutt.ac.th*[3]
[4]วิศวกร บริษัท บอริส จำกัด *Email: Aekkarat.Jumnongrat@gmail.com*

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียก เพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำเถ้าลอยเปียกไปใช้ประโยชน์ โดยใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง ทั้งสภาพแห้งและสภาพเปียก (จากห้องปฏิบัติการ) ที่มีปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือน) โดยแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) แล้วทดสอบการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 ผลการศึกษาพบว่า การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ทั้งผสมเถ้าลอยแห้งและผสมเถ้าลอยเปียกมีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ OPC ล้วน โดยการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งมีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียก นอกจากนี้ พบว่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่มีความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือน มีค่าไม่แตกต่างกัน

ABSTRACT: This research was to study the expansion in sodium sulfate solution of mortar mixed with wet fly ash to development for the utilization of wet fly ash. The fly ash from BLCP power plant in Rayong province was used. Fly ash was used in both dry and wet fly ashes. In case of wet fly ash from laboratories were prepared with a moisture content of 25, 45 and 65 percent which each moisture content exposed to moisture for a period of 1 week, 1 month and 3 months. The partially replacing fly ash in cement Portland type 1 (OPC) were performed. The expansion of mortar in sodium sulfate solution with a concentration of 5 percent was considered. The results showed that the expansion in sodium sulfate solution of mortar both mixed with dry and wet fly ashes were less than those of OPC mortar. The expansion in sodium sulfate solution of mortar mixed with dry fly ash had more than that of mortar mixed with wet fly ash. In addition, the expansion in sodium sulfate solution of mortar mixed with wet fly ash having 25%, 45% and 65% moisture content those exposed to moisture for 1 week, 1 month and 3 months had no difference.

KEYWORDS: Expansion, Sodium sulfate solution, Mortar, Wet fly ash

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีความสำคัญ ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีต ผู้ออกแบบจะคำนึงถึงโครงสร้างคอนกรีตในการรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย แต่ในปัจจุบันความแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีตยังต้องขึ้นอยู่กับความคงทนของเนื้อคอนกรีตจึงต้องมีการพัฒนาการออกแบบส่วนผสมหรือการพัฒนาองค์ประกอบของคอนกรีตให้มีการใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ทำให้คอนกรีตมีการต้านทานสารเคมีที่ทำให้เกิดอันตรายต่อโครงสร้างทำให้เกิดการแตกร้าวของโครงสร้าง และยังต้องคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมและการนำสิ่งแวดล้อมมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โครงสร้างคอนกรีตบางประเภทต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมซึ่งมีสารซัลเฟตที่อยู่ในรูปของสารละลายซึ่งสามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ [1] ซึ่งจะพบได้ในดิน น้ำใต้ดิน น้ำเสียจากบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรม โรงงานผลิตสารเคมีบางประเภท และในน้ำทะเลที่มีซัลเฟตเป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างของซัลเฟตที่พบมากในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อคอนกรีต เช่น โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต และแคลเซียมซัลเฟต เป็นต้น

ปัจจุบันในประเทศไทยมีการใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เถ้าก้นเตา ผงหินปูน ซิลิกาฟูม และเถ้าลอย เป็นการนำวัสดุเหล่านี้มาใช้ในงานคอนกรีต ยังสามารถช่วยอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ และลดปริมาณการใช้พลังงาน นำไปสู่การลดต้นทุนในการผลิต การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของอุตสาหกรรมคอนกรีต และปรับปรุงความทนทานของผลิตภัณฑ์คอนกรีต [2]

เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินประเทศไทยจะมีปริมาณเถ้าลอยประมาณ 3 ล้านตันต่อปี ที่ผ่านมาเถ้าลอยส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตโดยการนำเถ้าลอยมาแทนที่ปูนซีเมนต์การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ ประการแรกพบว่าเถ้าลอยมีออกไซด์ของธาตุซิลากา อลูมินา และเหล็กซึ่งออกไซด์เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม ประการที่สอง เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีตเถ้าลอยจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็กๆระหว่างปูนซีเมนต์และหินหรือทรายทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น [3] เถ้าลอยที่ไม่มีการนำมาใช้จะนำไปทิ้งใกล้บริเวณโรงไฟฟ้า โดยอาจสัมผัสกับความชื้นของสภาพแวดล้อมและน้ำฝน บางครั้งจะต้องมีการใส่น้ำเข้าไปก่อนที่จะนำไปทิ้งเพื่อไม่ให้เกิดการฟุ้งกระจาย จึงทำให้เถ้าลอยที่ไม่มีการนำมาใช้อยู่ในรูปแบบเถ้าลอยเปียกและไม่มีการนำกลับมาใช้ใหม่

จากปัญหาดังกล่าวเพื่อให้สามารถนำเถ้าลอยเปียกกลับมาใช้ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์ โดยใช้เถ้าลอยเปียกแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อเป็นแนวทางในการนำเถ้าลอยเปียกไปใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตอย่างเหมาะสม โดยเฉพาะในสิ่งแวดล้อมที่สัมผัสกับซัลเฟตต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย จากโรงไฟฟ้า BLCP จ.ระยอง ที่ได้จากถ่านหินที่ผสมระหว่าง Hunter Valley และ Melawan (HM) ซึ่งมีปริมาณ CaO ต่ำ (Low CaO) ทรายน้ำจืด และสารโซเดียมซัลเฟต

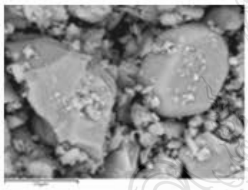
ตารางที่ 1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลน ส่วนตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมี ในขณะที่ภาพที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคโดยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) ซึ่งขยาย 3,500 เท่า ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย ที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 1 ความถ่วงจำเพาะความละเอียดโดยวิธีเบลนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย

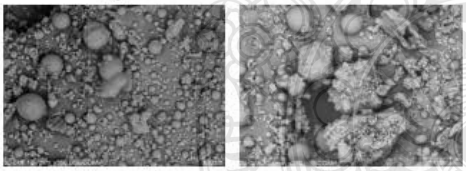
รายการ	ความถ่วงจำเพาะ	ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ซม.^{2}/ก)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	3.15	3,250
เถ้าลอย	2.25	3,550

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย

ร้อยละออกไซด์	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย (ระยะเวลาสัมผัสความชื้นที่ 3 เดือน)			
		แห้ง	25W	45W	65W
SiO_2	18.93	61.09	61.39	61.26	61.30
Al_2O_3	5.51	20.35	19.99	20.11	20.06
Fe_2O_3	3.31	5.20	5.32	5.19	5.14
CaO	65.53	2.32	1.75	1.83	1.90
MgO	1.24	1.35	1.36	1.35	1.37
SO_3	2.88	0.28	0.28	0.21	0.25
Na_2O	0.15	0.79	1.16	1.33	1.03
K_2O	0.31	1.36	1.32	1.40	1.14
TiO_2	-	0.98	1.01	0.93	0.99
P_2O_5	-	0.23	0.30	0.32	0.30
CaO	-	0.03	0.02	0.02	0.04
LOI	-	5.68	5.81	5.82	5.92



ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ข) เถ้าลอยแห้ง ค) เถ้าลอยเปียก

ภาพที่ 1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคโดยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) ซึ่งขยาย 3,500 เท่า ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียกปริมาณความชื้นร้อยละ 65 ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 3 เดือน

2.2 การเตรียมเถ้าลอย

เถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียก ในส่วนเถ้าลอยเปียกนั้น เป็นเถ้าลอยเปียกที่ได้จากห้องปฏิบัติการนั้นเตรียมโดย ใช้ปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 25 45 และ 65 แต่ละปริมาณความชื้นนั้นให้มีระยะเวลาสัมผัสความชื้นที่ 1 สัปดาห์ (1W) 1 เดือน (1M) และ 3 เดือน (3M)

2.3 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับการศึกษาการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตในครั้งนี้นั้น กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 1012 [4] โดยใช้ตัวอย่างแท่งมอร์ต้าร์ขนาด 2.5x2.5x28.5 เซนติเมตร หลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน แล้วนำตัวอย่างมอร์ต้าร์ไปแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (Saturated lime water) เป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ได้เตรียมไว้ โดยใช้ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมซัลเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (ใช้สารโซเดียมซัลเฟต 50 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร) และจะมีการเปลี่ยนสารละลายโซเดียมซัลเฟตทุกๆ 2 เดือนของการแช่ตัวอย่าง โดยหลังจากแช่ตัวอย่างในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว เป็นเวลา 28 วัน ทำการวัดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดความยาว (Length Comparator) กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 490 [5] แล้วนำตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต โดยทำการวัดความการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อายุ 1 3 7 14 28 วัน และที่อายุทุกๆ 1 เดือน ของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สำหรับการขยายตัวของตัวอย่างเป็นการเฉลี่ยการขยายตัว 3 แท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ ค่าการขยายตัวของตัวอย่างคำนวณจาก

$$\text{การขยายตัว (\%)} = [(L_t - L_i)/285]\times 100$$

โดยที่ L_i คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างหลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน (มิลลิเมตร) และ L_t คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของตัวอย่างหลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (มิลลิเมตร)

2.4 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้

สำหรับสัดส่วนผสมของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยที่ใช้ศึกษาการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ได้ใช้สัดส่วน 21 ตัวอย่าง ประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ต

แลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M) แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการทดสอบการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

สัญลักษณ์	ส่วนผสมของมอร์ต้าร์ (กรัม)		
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ทราย
C	1.00	-	2.75
C-30FA	0.70	0.30	2.75
C-50FA	0.50	0.50	2.75
C-30FA-25W-1W	0.70	0.30	2.75
C-50FA-25W-1W	0.50	0.50	2.75
C-30FA-45W-1W	0.70	0.30	2.75
C-50FA-45W-1W	0.50	0.50	2.75
C-30FA-65W-1W	0.70	0.30	2.75
C-50FA-65W-1W	0.50	0.50	2.75
C-30FA-25W-1M	0.70	0.30	2.75
C-50FA-25W-1M	0.50	0.50	2.75
C-30FA-45W-1M	0.70	0.30	2.75
C-50FA-45W-1M	0.50	0.50	2.75
C-30FA-65W-1M	0.70	0.30	2.75
C-50FA-65W-1M	0.50	0.50	2.75
C-30FA-25W-3M	0.70	0.30	2.75
C-50FA-25W-3M	0.50	0.50	2.75
C-30FA-45W-3M	0.70	0.30	2.75
C-50FA-45W-3M	0.50	0.50	2.75
C-30FA-65W-3M	0.70	0.30	2.75
C-50FA-65W-3M	0.50	0.50	2.75

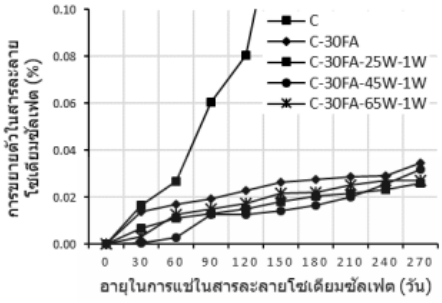
หมายเหตุ: C หมายถึง ตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ควบคุม) 30FA หมายถึง การแทนที่เถ้าลอย ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก 25W หมายถึง ปริมาณความชื้นของเถ้าลอยที่ร้อยละ 25 และ 1W หมายถึง ระยะเวลาที่เถ้าลอยสัมผัสความชื้นเท่ากับ 1 สัปดาห์

3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

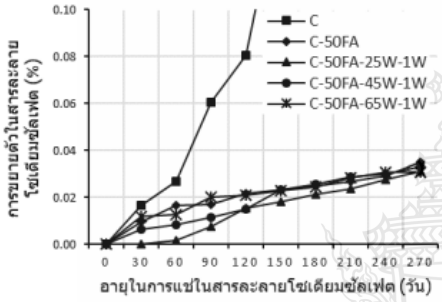
สำหรับการศึกษาการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในครั้งนี้ได้พิจารณาถึงผลกระทบต่อการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต คือ 1) ผลกระทบของเถ้าลอยเปียก 2) ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียก และ 3) ผลกระทบของปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียก โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1) ผลกระทบของเถ้าลอยเปียกต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ควบคุม มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกโดยปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียกร้อยละ 25 45 และ 65 เมื่อระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกที่ 1 สัปดาห์ พบว่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียก (ทั้งที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) ที่ระยะสัมผัสกับความชื้น 1 สัปดาห์ มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ควบคุม ทั้งนี้เพราะการลดปูนซีเมนต์ทำให้ C_3A ลดลง รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ลด $Ca(OH)_2$ ลง ส่งผลให้เกิดยิปซั่มและ Ettringite น้อยลง การขยายตัวจึงมีค่าน้อย ส่วนเมื่อพิจารณามอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกทุกกรณีมีแนวโน้มว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งมีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเนื่องจากเถ้าลอยเปียกมีน้ำเคลือบอนุภาคของเถ้าลอยอยู่แล้วจึงทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้ดีกว่าส่งผลให้ลด $Ca(OH)_2$ ได้มากกว่า และทึบน้ำมากกว่าทำให้สารละลายซัลเฟตเข้าได้ยากขึ้นส่งผลให้เกิด Ettrigite น้อยกว่า



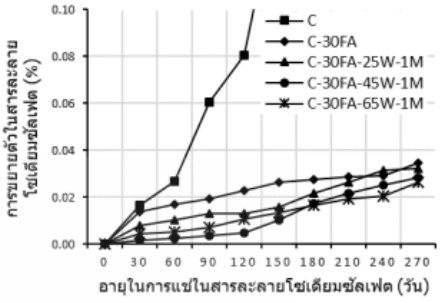
ก) เถ้าลอย ร้อยละ 30



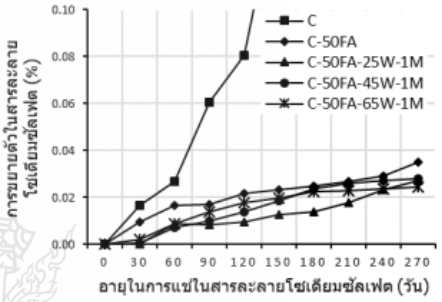
ข) เถ้าลอย ร้อยละ 50

ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ควบคุม มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียก เมื่อระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกที่ 1 สัปดาห์

ภาพที่ 3 และ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ควบคุม มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกโดยปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียกร้อยละ 25 45 และ 65 เมื่อระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกที่ 1 เดือน และ 3 เดือน พบว่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ควบคุม เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

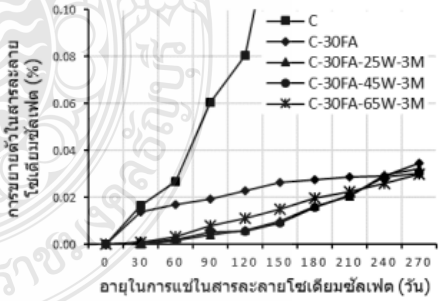


ก) เถ้าลอย ร้อยละ 30

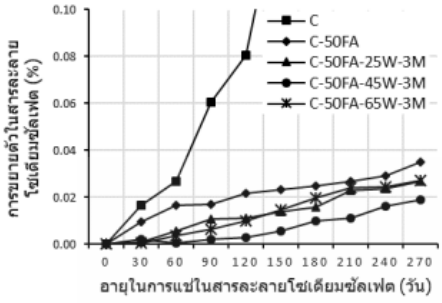


ข) เถ้าลอย ร้อยละ 50

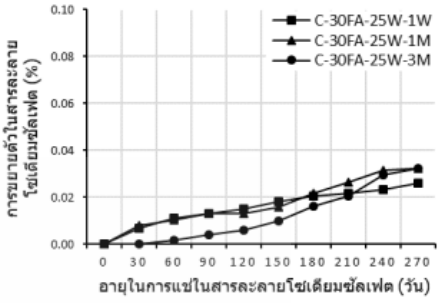
ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ควบคุม มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียก เมื่อระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกที่ 1 เดือน



ก) เถ้าลอย ร้อยละ 30



ข) เถ้าลอย ร้อยละ 50

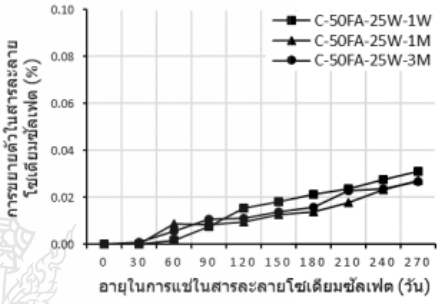


ก) เถ้าลอย ร้อยละ 30

ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ควบคุม มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียก เมื่อระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกที่ 3 เดือน

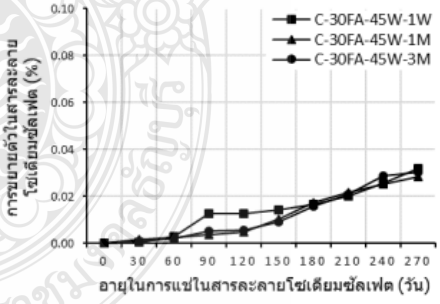
3.2) ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ภาพที่ 5 6 และ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ควบคุม และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียก เมื่อระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอย 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือน พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอย 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือน (ทั้งที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) มีค่าไม่แตกต่างกัน นั้นแสดงผลกระทบของระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ไม่มีผลต่อค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

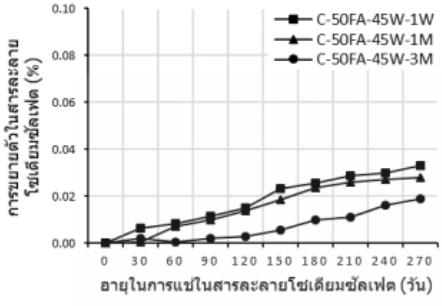


ข) เถ้าลอย ร้อยละ 50

ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 25

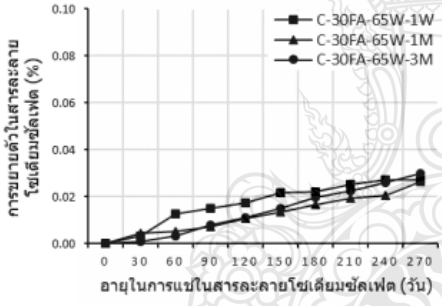


ก) เถ้าลอย ร้อยละ 30

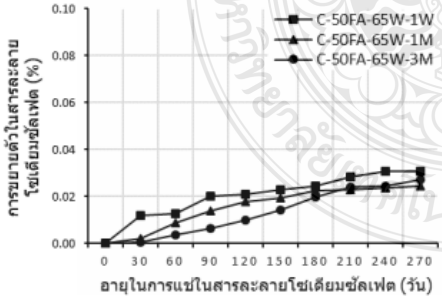


ข) เถ้าลอย ร้อยละ 50

ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 45



ก) เถ้าลอย ร้อยละ 30

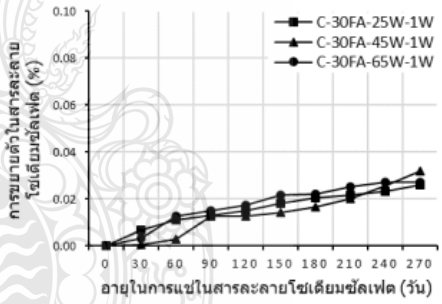


ข) เถ้าลอย ร้อยละ 50

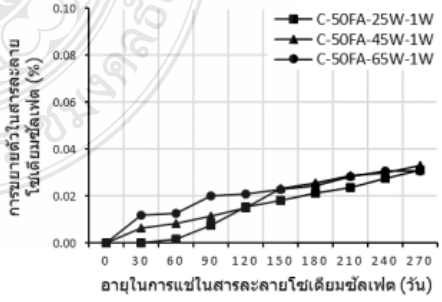
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 65

3.3) ผลกระทบของปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ภาพที่ 8 9 และ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ควบคุม และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่มีปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 พบว่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่มีปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่ระยะสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือน) มีค่าไม่แตกต่างกัน นั้นแสดงว่าผลกระทบของปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียกไม่มีผลต่อค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

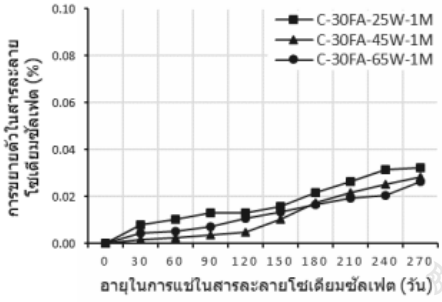


ก) เถ้าลอย ร้อยละ 30

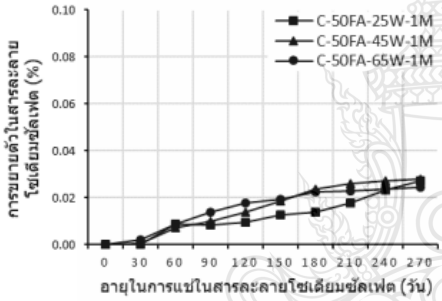


ข) เถ้าลอย ร้อยละ 50

ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอย 1 สัปดาห์

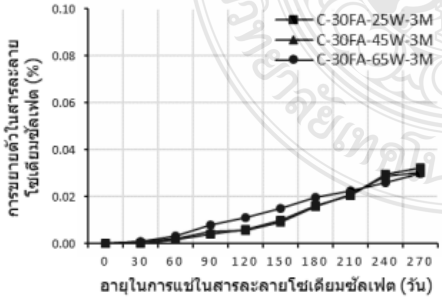


ก) เถ้าลอย ร้อยละ 30

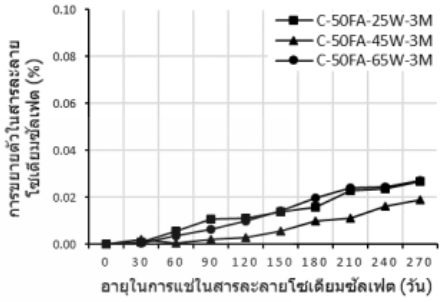


ข) เถ้าลอย ร้อยละ 50

ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอย 1 เดือน



ก) เถ้าลอย ร้อยละ 30



ข) เถ้าลอย ร้อยละ 50

ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอย 3 เดือน

4. สรุป

1) การใช้เถ้าลอย (ทั้งแห้งและเปียก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่งผลให้ การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ควบคุม

2) การใช้เถ้าลอยเปียกแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่งผลให้ การขยายตัวน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของเถ้าลอยแห้ง

3) ปริมาณความชื้นและระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียก ไม่ส่งผลกระทบต่อการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

[1] Tangtermsirikul, S. and Bumrungwong, C, **Conceptual Model for Determining Optimum Proportion of Fly Ash in Sulfate resisting Concrete**, Proceedings of the 3rd National Convention on Civil Engineering, Thailand, January. 1997

[2] ชัยณรงค์ เรื่องลือ,ทีฆทัศน์ บุญใย,ธีระวุฒิ รักมิตร และ อดิสรณ์ กองธรรม. **การขยายตัวของมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในสารละลายซัลเฟต**. ปริญญานิพนธ์. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. 2551

[3] คม บัวคลี่ และ บุญไชย สถิตมั่นในธรรม, "การผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย," **เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งประเทศชาติ**, ครั้งที่ 1, พ.ศ. 2546, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า 14-16.

[4] American Society for Testing and Materials. ASTM C 1012 - 04: Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. Annual Book of ASTM Standards. 2004.

[5] American Society for Testing and Material, ASTM C 490, 1994, "Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete", Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.01, Philadelphia, PA, USA.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายนรากร สุดทำนอง
วัน – เดือน – ปี เกิด	วันที่ 10 พฤศจิกายน 2525
ที่อยู่	30 ตำบลประชาธิปัตย์ อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12130
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์ทำงาน	บริษัท ธัชชาธร คอนสตรัคชั่น จำกัด ธ.ค. 2557 – ปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	09-4417-1649
อีเมล์	i_tom_absurd@live.com