ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา	วิศวกรรมโยธา
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง ประสิทธิภาพของซีโอไลท์สังเคราะห์ (ซีโอไลท์ เอ) ในการควบคุมความเสียหายจากปฏิกิริยา *ASR*

Efficiency of Synthetic Zeolite (Zeolite A) on Damage Control of *ASR*

นามผู้วิจัย นายชนากร วงศ์ธนสารสิน

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(รองศาสตราจารย์สุวิมล สัจจวาณิชย์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ....

(อาจารย์จักรพันธ์ เทือกต๊ะ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ .... **เดือน** .... **พ.ศ.** ....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ประสิทธิภาพของซีโอไลท์สังเคราะห์ (ซีโอไลท์ เอ) ในการควบคุมความเสียหายจากปฏิกิริยา ASR

Efficiency of Synthetic Zeolite (Zeolite A) on Damage Control of ASR

โดย

นายชนากร วงศ์ธนสารสิน

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
พ.ศ. 2558

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชนากร วงศ์ธนสารสิน 2558: ประสิทธิภาพของซีโอไลท์สังเคราะห์ (ซีโอไลต์ เอ) ในการควบคุมความเสียหายจากปฏิกิริยา ASR ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์สุวิมล สัจจวาณิชย์, Ph.D. 129 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ (ซีโอไลท์ เอ) เพื่อควบคุม ความเสียหายเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างด่างกับซิลิกาของมวลรวมบางชนิดในคอนกรีต (ASR) โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วนคือ 1. การทดสอบการกระตุ้นซีโอไลท์และการทดสอบด้วยเทคนิควิเคราะห์ทางวัสดุ 2. การทดสอบพฤติกรรมการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่ไม่ใช้และใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์จากอุตสหกรรมและซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ได้รับการกระตุ้น 3. การทดสอบคอนกรีตปริซึม รวมถึงการทดสอบซีโอไลท์ธรรมชาติเพื่อเปรียบเทียบ นอกจากนี้ยังทดสอบวิธีกระตุ้นซีโอไลท์สังเคราะห์วิธีอื่นเพื่อเปรียบเทียบและเสนอแนะ

ผลการศึกษาพบว่า การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ที่มีผลต่อการควบคุมปฏิกิริยา ASR ต้องใช้ในปริมาณน้อย (<5%) ซีโอไลท์สังเคราะห์ที่มีปริมาณโซเดียมไอออนสูงและสามารถปลดปล่อยโซเดียมไอออนออกมาและมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ASR การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ปรับปรุงแล้วช่วยลดการขยายตัวได้ดีขึ้น แต่ยังคงต้องใช้ปริมาณน้อย ผลทดสอบพบว่าซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงในปริมาณร้อยละ 2.5 สามารถลดการขยายตัวของคอนกรีตได้ดีที่สุดและสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้ดีขึ้น

การศึกษาเปรียบเทียบกับซีโอไลท์ธรรมชาติซึ่งเป็นสารปอซโซลานพบว่า สามารถลดการขยายตัวจากปฏิกิริยา ASR ได้เมื่อใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณมากร้อยละระหว่าง 10 ถึง 20 โดยสามารถลดการขยายตัวของมอร์ต้าร์ได้ดีกว่าซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง

____________________ ____________________ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Chanakorn Wongtanasarasin 2015: Efficiency of Synthetic Zeolite (Zeolite A) on Damage Control of ASR. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Suvimol Sujjavanich, Ph.D. 129 pages.

This thesis investigated the feasibility of using synthetic zeolite to control ASR damage. The study was divided into 3 parts: 1. Investigation of material and zeolite activation. 2. Expansion test of mortars with and without synthetic and modified synthetic zeolite. 3. Expansion and mechanical tests of concrete. Other activation methods were also included in this study for comparison and recommendation.

The results show that the use of small amount of synthetic zeolite (<5%) resulted in the decrease of ASR expansion. The high sodium ion content of the studied synthetic zeolite, resulted in the leaching of sodium and the consequently the increase of the expansion if large amount was used. The mixture with 2.5% modified synthetic zeolite was found to be most effective in reducing the expansion, while improving the mechanical properties of the concrete.

The use of 10 to 20 percent cement replacement by natural zeolite yielded the better expansion reduction compared to those of synthetic zeolite.

______________________________ ______________________________ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ซึ่งไม่อาจจะนำมากล่าวได้ทั้งหมด ท่านแรกที่ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณคือ รองศาสตราจารย์ สุวิมล สัจจวาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้สอนที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำตรวจทาน และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ งานวิจัยนี้ได้รับทุนทำวิจัยส่วนหนึ่งจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ไพศาล คงคาฉุยฉาย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่กรุณาให้คำปรึกษาที่สำคัญและสนับสนุนเครื่องมือ ขอขอบคุณ บุคลากร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทุกท่านที่ให้คำแนะนำและให้การสนับสนุนในด้านเครื่องมือ สถานที่ การทำหนังสือขอความอนุเคราะห์ต่างๆทำให้การวิจัยครั้งนี้เป็นไปอย่างราบรื่น และ ตลอดจนได้รับความอนุเคราะห์จากหน่วยงาน บริษัท สถาบันทั้งหลายดังนี้ บริษัทพีคิว เคมิคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด บริษัทสยามวิจัยและพัฒนา จำกัด ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคารคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ และสถาบันเหล็กและเหล็กเกล้าแห่งประเทศไทย ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย และที่ขาดไม่ได้คือขอขอบคุณพี่และเพื่อนนิสิตสาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทุกท่านที่สละเวลาอันมีค่ามาช่วยทำงานวิจัยนี้ ซึ่งผู้วิจัยซาบซึ้งและขออวยพรให้ทุกท่านจงพบแต่ความสำเร็จลุล่วงสมปรารถนาทุกประการ

สุดท้ายนี้ขอมอบคุณงานความดีทั้งหมดให้แก่บิดาและมารดาอันเป็นที่รัก ซึ่งให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจ จนทำให้สามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ชนากร วงศ์ธนสารสิน

มีนาคม 2558

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการศึกษา	31
อุปกรณ์	31
วิธีการดำเนินการศึกษา	32
ผลการทดสอบและการวิจารณ์	46
สรุปและข้อเสนอแนะ	68
สรุป	68
ข้อเสนอแนะ	69
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	70
ภาคผนวก	83
ภาคผนวก ก อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	84
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกระตุ้นซีโอไลท์	89
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบพฤติกรรมการควบคุมการขยายตัวของมอร์ต้าร์กำลังรับแรงอัด และความสามารถในการเทเบื้องต้น	94
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบพฤติกรรมการควบคุมการขยายตัวของคอนกรีตระยะยาว สมบัติทางกล และความสามารถในการเท	120
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	129

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่		หน้า
1	รูปแบบซิลิกาที่เกิดปฏิกิริยาในมวลรวมชนิดต่างๆ	9
2	วิธีทดสอบปฏิกิริยา ASR ของมวลรวม	15
3	ขนาดคละของมวลรวมสำหรับแท่งมอร์ต้าร์	38
4	ปริมาณวัสดุสำหรับก้อนตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าร์รูปลูกบาศก์	39
5	การทดสอบการขยายตัวและสมบัติทางกลของคอนกรีต ณ อายุต่างๆ	41
6	ขนาดคละของมวลรวมที่แนะนำสำหรับคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ	42
7	ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการผสมคอนกรีต	43
8	ขั้นตอนการผสมคอนกรีตที่แนะนำ	43
9	ส่วนประกอบทางเคมีของซีโอไลท์แต่ละประเภท	47
10	การเปรียบเทียบส่วนประกอบหลักของซีโอไลท์สังเคราะห์ก่อนและหลังกระตุ้นด้วยวิธีต่างๆ	48
11	ผลการทดสอบซีโอไลท์จาก บ. พีคิว เคมิคอลส์ (ประเทศไทย)	50
12	ผลการทดสอบปริมาณไอออนโซเดียมในสารละลาย NaOH	51
13	ผลการทดสอบปริมาณไอออนโซเดียมในน้ำ	51

ตารางผนวกที่

ตารางผนวกที่		หน้า
ค1	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ควบคุม	95
ค2	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ 0.5%	96
ค3	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ 1.0%	97
ค4	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ 1.5%	98
ค5	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ 2.5%	99
ค6	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ 5.0%	100
ค7	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ 7.5%	101
ค8	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ 10%	102
ค9	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 0.5%	103
ค10	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 1.0%	104
ค11	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 1.5%	105

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ค12	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 2.5%	106
ค13	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติแทนที่ 10%	107
ค14	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติแทนที่ 20%	108
ค15	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ควบคุม (วิธีปรับปรุง)	139
ค16	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 0.5% (วิธีปรับปรุง)	110
ค17	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 1.0% (วิธีปรับปรุง)	111
ค18	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 1.5% (วิธีปรับปรุง)	112
ค19	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 2.5% (วิธีปรับปรุง)	113
ค20	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ 35% (วิธีปรับปรุง)	114
ค21	การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ 50% (วิธีปรับปรุง)	115
ค22	กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ อายุ 7 วันในน้ำ	116
ค23	กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ อายุ 28 วันในน้ำ	117
ค24	ผลการทดสอบการไหลของซีเมนต์เพสต์	119
ค25	ผลการทดสอบการไหลของมอร์ต้าร์	119
ง1	การขยายตัวของชุดคอนกรีตควบคุม (RILEM AAR4)	121
ง2	การขยายตัวของชุดคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 0.5%	122
ง3	การขยายตัวของชุดคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 1.5%	123
ง4	การขยายตัวของชุดคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 2.5%	124
ง5	ผลการทดสอบสมบัติทางกลของคอนกรีต	125
ง6	ผลการทดสอบค่าความยุบตัวของคอนกรีต	128

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

1 โครงสร้างคอนกรีตที่เสียหายจากปฏิกิริยา ASR แบบ Map-Cracking 4
2 ประเทศที่พบรายงานการเกิดปฏิกิริยา ASR 5
3 โครงสร้างผลึก Silica Tetrahedral 6
4 ผลของปริมาณซิลิกาต่อปฏิกิริยา ASR 11
5 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับความชื้นสัมพัทธ์ 12
6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดปฏิกิริยากับระยะเวลาที่อุณหภูมิ 20 และ 40°C 14
7 สมบัติเชิงกลและการขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้หินไรโอไลต์เทียบกับเวลา 16
8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ OH^- ในสารละลายกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ 18
9 ผลการขยายตัวกับองค์ประกอบทางเคมีในรูปของดัชนีเคมีของปูนซีเมนต์ 19
10 ส่วนประกอบทางแร่ของหิน 20
11 โครงสร้างทางเคมีและโครงสร้างพื้นฐานของซีโอไลท์ 21
12 ตัวอย่างซีโอไลท์ธรรมชาติชนิดต่างๆ 22
13 โครงสร้างซีโอไลท์ธรรมชาติชนิด Clinoptilolite 23
14 ตัวอย่างซีโอไลท์สังเคราะห์ชนิด Zeolite Y 23
15 โครงสร้างซีโอไลท์สังเคราะห์ชนิด Zeolite A 24
16 การขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์เมื่อใช้ซีโอไลท์ในสัดส่วนต่างๆ 27
17 การเปรียบเทียบการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์และเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณต่างกันที่ อายุ 16 วัน 27
18 การขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์เมื่อใช้ซีโอไลท์ปรับปรุงในสัดส่วนต่างๆ 28
19 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของมอร์ต้าร์กับ CEC 28
20 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์เมื่อใช้ซีโอไลท์ในสัดส่วนต่างๆ 30
21 ภาพขยายซีโอไลท์สังเคราะห์ (ซีโอไลท์ เอ) 32
22 ภาพขยายซีโอไลท์ธรรมชาติ (Clinoptilolite) 33
23 ภาพขยายเถ้าลอย 34
24 แผนผังแนวทางการศึกษา 35
25 แนวทางการทดสอบคอนกรีต 45
26 ผลการทดสอบ XRD ของซีโอไลท์สังเคราะห์ก่อนผ่านกระบวนการกระตุ้น 49

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

27 ผลการทดสอบ XRD ของซีโอไลท์สังเคราะห์หลังผ่านกระบวนการกระตุ้น 49
28 ค่าเฉลี่ยการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์โดยวิธี ASTM C1260 54
29 ค่าเฉลี่ยการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงโดยวิธี ASTM C1260 54
30 ค่าเฉลี่ยการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์ธรรมชาติโดยวิธี Modified ASTM C1260 55
31 ค่าเฉลี่ยการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงโดยวิธี Modified ASTM C1260 57
32 ค่าเฉลี่ยการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงโดยวิธี Modified ASTM C1260 57
33 กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์ 59
34 เปอร์เซนต์การไหลของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ 60
35 เปอร์เซนต์การไหลของมอร์ต้าร์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ 61
36 ค่าการยุบตัวเฉลี่ยของคอนกรีตที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง 62
37 การขยายตัวเฉลี่ยของคอนกรีตปริซึมที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง 63
38 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง 64
39 กำลังรับแรงดึงเฉลี่ยของคอนกรีตที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง 65
40 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง 66

ภาพผนวกที่

ก1 อุปกรณ์การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ 85
ก2 แบบหล่อแท่งมอร์ต้าร์และการวัดระยะห่างระหว่างหมุด 85
ก3 แบบหล่อลูกบาศก์มอร์ต้าร์ และการทดสอบลูกบาศก์มอร์ต้าร์ 86
ก4 แบบหล่อคอนกรีตปริซึม และภาชนะบ่มด้วยไอน้ำ 86
ก5 ตู้เร่งปฏิกิริยาควบคุมอุณหภูมิและความชื้น 86
ก6 แบบหล่อทรงกระบอก และเครื่องผสมคอนกรีต 87

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่ **หน้า**

ก7 การควบคุมอุณหภูมิหลังนำออกจากตู้ควบคุมอุณหภูมิ 87
ก8 การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 87
ก9 อุปกรณ์การทดสอบการไหลของซีเมนต์เพสต์ และการทดสอบการไหล 88
ก10 อุปกรณ์การทดสอบการไหลของมอร์ต้าร์ และการทดสอบการไหล 88
ก11 อุปกรณ์สำหรับทดสอบการกระตุ้นซีโอไลท์ 88
ข1 ผล XRF ของปูนซีเมนต์ ซีโอไลท์สังเคราะห์ และซีโอไลทธรรมชาติ 90
ข2 ผล XRF ของซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง 91
ข3 ผล XRD ของซีโอไลท์สังเคราะห์ และซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง 92
ข4 ผลการทดสอบ AAS 93
ค1 กำลังอัดของลูกบากศ์มอร์ต้าร์ อายุ 7 วันในน้ำ 118
ค2 กำลังอัดของลูกบากศ์มอร์ต้าร์ อายุ 28 วันในน้ำ 118
ง1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่ อายุต่างๆ 127
ง2 กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตทรงกระบอกที่ อายุต่างๆ 127
ง3 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอกที่ อายุต่างๆ 128

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประสิทธิภาพของซีโอไลท์สังเคราะห์ (ซีโอไลท์ เอ) ในการควบคุมความเสียหายจากปฏิกิริยา ASR

Efficiency of Synthetic Zeolite (Zeolite A) on Damage Control of ASR

คำนำ

คอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้งานก่อสร้างต่างๆในประเทศ ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ มวลรวม และน้ำเป็นหลักโดยอาจมีสารผสมเพิ่มและสารปอซโซลานเป็นส่วนผสม ปัญหาการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากปฏิกิริยาแอลคาไลกับมวลรวม AAR (Alkaline Aggregate Reaction) ได้รับการระบุและยืนยันครั้งแรกเมื่อกว่า 70 ปีที่แล้ว (Stanton, 1940) แม้งานวิจัยในปัจจุบันจะมีการศึกษาต่อเนื่องมาโดยตลอดแต่ก็ยังไม่มีข้อสรุปที่สามารถใช้อธิบายหรือแก้ปัญหาอย่างสมบูรณ์ จึงเป็นความท้าทายของนักวิจัยทั่วโลกที่จะแก้ปัญหานี้ สำหรับประเทศไทย ความรู้เรื่องปฏิกิริยานี้ยังไม่เป็นที่รู้จักแพร่หลายสำหรับวิศวกรโดยทั่วไป เนื่องจากประเทศไทยไม่มีรายงานการพบปัญหานี้มาก่อนจนกระทั่งปี พ.ศ.2552 มีการพบและยืนยันปัญหาของปฏิกิริยานี้จากโครงสร้างจริงในประเทศไทยแล้ว (สุวิมล และคณะ, 2553; Sujjavanich *et al*., 2012)

ปฏิกิริยาระหว่างแอลคาไลกับแร่ธาตุซิลิกาในมวลรวม หรือ ASR (Alkaline Silica Reaction) เป็นปฏิกิริยาประเภทหนึ่งของปฏิกิริยา AAR โดยที่แอลคาไลในสารละลายในโพรงคอนกรีตเข้าทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุบางชนิดในหินหรือทรายบางชนิด และเกิดเป็นเจล (ASR gel) ขึ้นรอบๆมวลรวมในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา เมื่อ ASR gel สัมผัสความชื้น จะดูดซับความชื้นและขยายตัวทำให้เกิดแรงดึงในคอนกรีต (Stanton,1940) หากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีค่าเกินกำลังรับแรงของคอนกรีต ก็อาจทำให้เกิดการแตกร้าวในลักษณะ Map cracking (รอยร้าวแผ่นที่) หรือในลักษณะอื่นได้ ขึ้นกับสภาพยึดรั้งในโครงสร้างนั้น รอยแตกร้าวอาจทำให้คอนกรีตสูญเสียสมบัติด้านสภาพใช้งาน, กำลัง ตลอดจนความคงทน เพราะรอยแตกจะเป็นช่องทางให้สารต่างๆแพร่หรือเคลื่อนสู่คอนกรีตได้ง่ายขึ้น

การป้องกันความเสียหายจาก ASR ของคอนกรีตมีความสำคัญต่อความปลอดภัยและต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างและสามารถทำได้หลายวิธี แม้ว่าแต่ละวิธีอาจให้ประสิทธิภาพต่างกัน การใช้สารปอซโซลานเช่น เถ้าลอย เมตาคาโอลิน ซิลิกาฟูม หรือ ซีโอไลท์ธรรมชาติ สามารถยับยั้งความเสียหายจาก ASR ได้(Sangsuwan and Sujjavanich, 2011; Thomas, 2011) แต่การใช้วัสดุที่มา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากผลพลอยได้ในอุตสาหกรรมหรือมาจากธรรมชาติเหล่านี้มักมีปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งคือ ความผันแปรของวัสดุสูง จึงนำไปสู่แนวคิดการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ที่สามารถผลิตได้จากโรงงานภายในประเทศ ในการควบคุมปฏิกิริยา ASR เนื่องจากสามารถควบคุมคุณภาพที่สม่ำเสมอได้และวัสดุเหล่านี้มีราคาไม่แพง

การศึกษาวิธีการป้องกันหรือชะลอการเกิดปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเนื่องจากจะเป็นส่วนสำคัญของการให้ข้อมูลหรือใช้เป็นทางเลือกหนึ่งของการแก้ปัญหานี้ในอนาคต โดยเฉพาะประเทศไทยที่มีความเป็นไปได้ว่าอาจประสบกับปัญหานี้เพิ่มขึ้นในอนาคตหากจำเป็นต้องใช้แหล่งหินท้องถิ่นในหลายพื้นที่ที่มีแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยา ASR ซึ่งมีรายงานการศึกษาบ้างแล้ว และผลการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อการหาแนวทางป้องกันปัญหา ASR สำหรับการก่อสร้างโครงสร้างใหม่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

ศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ควบคุมปัญหา ASR ในคอนกรีต โดยแทนที่ปูนซีเมนต์และศึกษาสัดส่วนการใช้งานยซีโอไลท์ที่เหมาะสม โดยเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์, คอนกรีต และคอนกรีตควบคุมตลอดจนการใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติ ในรูปแบบของการขยายตัวและสมบัติทางกล

ขอบเขตของการวิจัย

1. ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2. ใช้มวลรวมหินไรโอไลต์จากแหล่งหินภาคกลางของประเทศไทยและใช้วิธีการเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

3. ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ ประเภท ซีโอไลท์ เอ เกรดที่ผลิตเชิงพาณิชย์ในประเทศ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

ปฏิกิริยา ASR

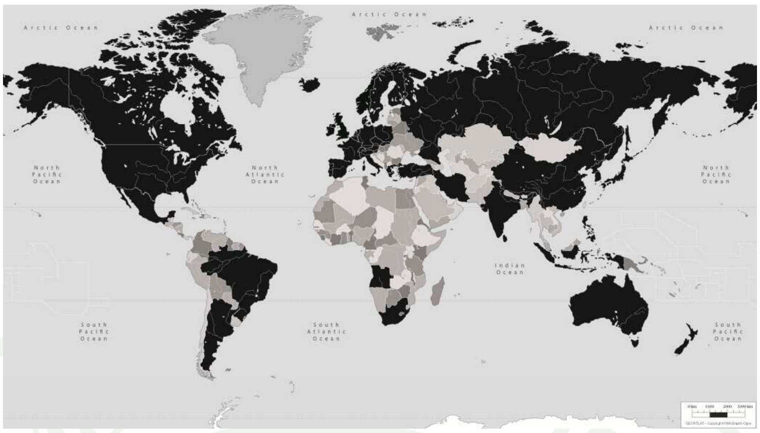
ปฏิกิริยา ASR เป็นปฏิกิริยาระหว่างแอลคาไลในสารละลายในโพรงคอนกรีตกับแร่ธาตุซิลิกาบางลักษณะที่พบในหินบางชนิด เช่น Opal, Chalcedony, Micro และ Cryptocrystalline Quart, Cristobalite, Volcanic Glasses เป็นต้น ทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นเจล (ASR gel) ขึ้นรอบๆและ/หรือภายในรอยร้าวของมวลรวม เมื่อ ASR gel สัมผัสกับความชื้น จะดูดซับความชื้นและขยายตัวทำให้แรงดันโดยรอบเพิ่มขึ้น หากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเกินกำลังรับแรงของคอนกรีตในขณะนั้นก็จะทำให้เกิดการแตกร้าว คอนกรีตที่มีเหล็กเสริมน้อยหรือไม่มีเหล็กเสริมอาจแตกร้าวในลักษณะ Map Cracking ได้ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยที่ปฏิกิริยานี้จะเกิดอย่างช้าๆและอาจแสดงความเสียหายภายหลังก่อสร้างไปแล้วประมาณ 15-20 ปี หรือมากกว่านั้น (Swamy, 1992)

ภาพที่ 1 โครงสร้างคอนกรีตที่เสียหายจากปฏิกิริยา ASR แบบ Map-Cracking

ที่มา: Federal Highway Administration (2013)

ปัญหาจากปฏิกิริยา ASR เป็นปัญหาการเสื่อมสภาพคอนกรีตที่สำคัญและมีรายงานการพบอย่างแพร่หลายทั่วโลก ดังแสดงในภาพที่ 2 รวมทั้งปัญหานี้ยังมีความไม่แน่นอนในการแก้ปัญหาได้อย่างสมบูรณ์ นานาชาติจึงได้จัดให้มีการประชุมวิชาการใหญ่ทุกๆ 4 ปี เรียกว่า International Conference on Alkali-Aggregate Reactions (ICAAR) เพื่อเสนอองค์ความรู้ใหม่สำหรับการเรียนรู้และหาทางแก้ไขหรือป้องกันปัญหานี้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากการประชุมครั้งสุดท้ายในปี ค.ศ. 2012 ที่มีนักวิจัยจาก 31 ประเทศทั่วโลกเข้าร่วม (Broekmans, 2013)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 2 ประเทศที่พบรายงานการเกิดปฏิกิริยา ASR

ที่มา: Broekmans (2013)

ปฏิกิริยา AAR แบ่งได้เป็น 3 ประเภท (Swamy, 1992) ดังต่อไปนี้

1. ปฏิกิริยา ASR (Alkali Silica Reaction) เป็นปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบแอลคาไลในปูนซีเมนต์กับแร่ซิลิกาบางรูปแบบในมวลรวมบางชนิด
2. ปฏิกิริยา ASSR (Alkali Silica Silicate Reaction) เป็นปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบแอลคาไลในปูนซีเมนต์กับแร่ประเภทซิลิเกตในมวลรวม โดยทั่วไปปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่า ASR
3. ปฏิกิริยา ACR (Alkali Carbonate Reaction) เป็นปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบแอลคาไลในปูนซีเมนต์กับแร่ประเภทคาร์บอเนตบางชนิดในมวลรวมเช่น Dolomitic limestone โดยที่ปฏิกิริยานี้ยังมีรายงานไม่มากนัก

การตรวจเอกสารในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่ ปฏิกิริยา ASR เป็นหลักเนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่พบมากที่สุด และมีรายงานการตรวจพบในประเทศไทยด้วย

กลไกการเกิดปฏิกิริยา ASR

การเกิดปฏิกิริยา ASR สามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 1 (Swamy, 1992)

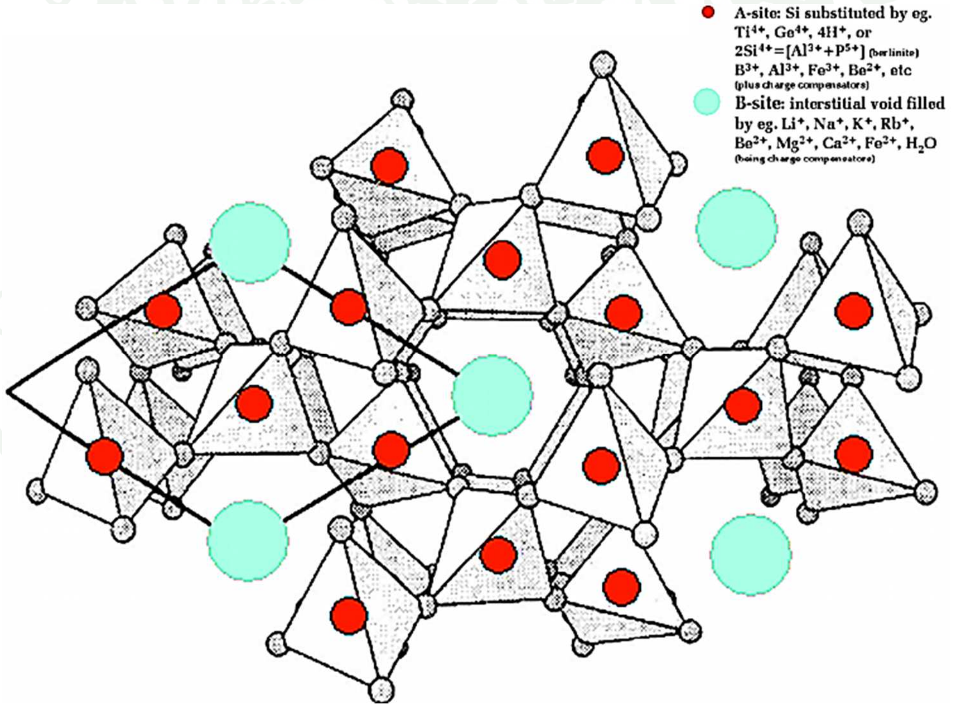
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$4SiO_2+2NaOH \rightarrow Na_2Si_4O_9+H_2O$$

(1)

$$SiO_2+2NaOH \rightarrow Na_2Si_3+H_2O$$

สมการข้างต้นอธิบายได้ดังนี้คือ ซิลิกาในมวลรวมมักมีพันธะเชื่อมต่อกันเรียกว่า Siloxane Bridges (Si-O-Si) ซึ่งประกอบขึ้นเป็นโครงสร้างลักษณะ Tetrahedral โดยซิลิกอนไอออนถูกล้อมด้วยออกซิเจนไอออน 4 ไอออนดังแสดงในภาพที่ 3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเริ่มจากไฮดรอกซิลอิออนแทรกซึมเข้าไปในมวลรวม ทำลายพันธะ Silicon-Oxygen linkages ของผลึก Silica Tetrahedral ทำให้ Silicon Hydroxide Ions เป็นประจุลบ และเมื่อสัมผัส Sodium หรือ Potassium ions ที่เป็นประจุบวกจะก่อตัวเป็น ASR gel (Crucq, 2005) ซึ่งเมื่อสัมผัสความชื้นจะบวมตัวสร้างแรงดึงประมาณ 6-7MPa (Neil Lee, 2009)



ภาพที่ 3 โครงสร้างผลึก Silica Tetrahedral

ที่มา: Broekmans (2013)

สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของ ASR gel มียังมีความไม่แน่นอน โดยที่ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนและแอลคาไลไอออนจะเป็นส่วนสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยานี้ (Vivian, 1951)

ปัจจัยสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยา ASR

1. แอลคาไล (Alkali)

ธาตุแอลคาไล คือ ธาตุหมู่ 1A ในตารางธาตุมีเวเลนซ์อิเล็กตรอน1 มีประจุไฟฟ้า+1 เมื่อเลขอะตอมของธาตุหมู่นี้เพิ่มขึ้นทำให้รัศมีอะตอม จุดหลอมเหลวและความหนาแน่นเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้ค่าพลังงานไอออไนเซชั่นและค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีลดลง ธาตุในหมู่นี้ส่วนใหญ่จะมีสีเงิน มีลักษณะเป็นโลหะเนื้ออ่อน มีความหนาแน่นต่ำ มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงมาก เกิดปฏิกิริยากับน้ำได้ก๊าซไฮโดรเจนและสารละลายมีสมบัติเป็นเบสและสารประกอบของธาตุแอลคาไลทุกตัวเป็นสารประกอบไอออนิกละลายน้ำได้ดี เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ แอลคาไลส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในโครงสร้างผลึกของเม็ดปูนซีเมนต์ จะทำให้จำนวนไฮดรอกซิลไอออนในสารละลายเพิ่มสูงขึ้นตามเวลา (Glasser, 1992) มีรายงานการศึกษาที่แสดงว่าการขยายตัวของมอร์ต้าในระยะแรกนั้นจะมีความแตกต่างกันมาก ถึงแม้ว่ามีปริมาณแอลคาไลในซีเมนต์เท่ากัน ทั้งนี้นักวิจัยให้ความเห็นว่าอาจมีสาเหตุจากความแตกต่างกันของแอลคาไลในปูนซีเมนต์ ในรูปแบบอัตราส่วนโซเดียมต่อโพแทสเซียม (Na/K) และการพัฒนากำลังที่ต่างกัน (Hobb, 1988) ดังนั้นในการประเมินปริมาณแอลคาไลทั้งหมดในปูนซีเมนต์หรือในคอนกรีตนั้นจึงกำหนดเป็น ค่าโซเดียมออกไซด์เทียบเท่า “Sodium Oxide Equivalent” Na_2O_{eq} ($Na_2O + 0.658K_2O$) ทั้งนี้มีรายงานว่าการผสมคอนกรีตที่ผลิตด้วยปูนซีเมนต์มีที่อัตราส่วน Na_2O_{eq} ใกล้เคียงกัน แต่มีอัตราส่วน Na/K ต่างกันจะทำให้มีการขยายตัวที่แตกต่างกันอย่างมากในสภาวะเร่งปฏิกิริยา (Leemann and Lothenbach, 2008) อย่างไรก็ตาม ยังมีรายงานที่ขัดแย้งกับข้อสรุปดังกล่าว (Bremseth, 2010) ทำให้ยังไม่อาจสรุปพฤติกรรมนี้ได้อย่างสมบูรณ์

แม้ว่าไอออน Na^+ และ K^+ จะให้ผลที่เหมือนกันในปฏิกิริยา ASR แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอาจแตกต่างกันเช่น K^+ อาจเกิดปฏิกิริยาในอัตราสูงกว่า Na^+ (Hou *et al.*, 2004) แต่ก็มีรายงานบางชิ้นที่สรุปว่า Na^+ มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่า K^+ (Borchers and Muller, 2009) ด้วย ดังนั้นเมื่อพิจารณาข้อมูลทั้งหมดนี้ก็ยังไม่มีข้อสรุปที่แน่นอนเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา ในปัจจุบันนิยมพิจารณาว่าหากปูนซีเมนต์ทั้งสองมีค่าเทียบเท่าโซเดียมออกไซด์เท่ากันแม้จะมีรูปแบบที่ต่างกันของ Na_2O และ K_2O ก็จะถือว่ามีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเทียบเท่ากัน

ในซีเมนต์เพสต์จะมีจำนวน Ca^{2+} ที่เพิ่มขึ้นตามเวลาและปริมาณ ASR gel จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณแอลคาไลที่ปล่อยออกมาในสารละลาย (Powers and Steinour, 1955; French, 1989; Lagerblad, J. Trägårdh, 1992) ในทางทฤษฎีนั้นการเพิ่มขึ้นนี้แสดงว่าปฏิกิริยา ASR จะดำเนิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ต่อไปเรื่อยๆจนกว่าซิลิกาทั้งหมดจะกลายเป็น ASR gel และสัมพันธ์กับจำนวน Ca^{2+} ในสารละลาย เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วแอลคาไลจากซีเมนต์อาจจะอยู่ในช่องว่างของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดชั่น หรืออยู่บริเวณผิวมวลรวมหรือ ASR gel ได้ (Rivard *et al.*, 2003)

จากข้อมูลขั้นต้นอาจสรุปได้ว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับแอลคาไลที่มีต่อปฏิกิริยามีดังนี้ ชนิดแอลคาไล, สัดส่วนช่องว่างต่อมวลรวม, ค่าpH และอุณหภูมิ และปริมาณแอลคาไลทั้งหมดในรูปของ Na_2O equivalent ($Na_2O + 0.658K_2O$)

2. มวลรวม (Aggregates)

มวลรวมเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดเพราะหากมวลรวมมีลักษณะเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยากับแอลคาไลแล้ว ปัจจัยอื่นๆก็ไม่มีความสำคัญและไม่เกิดปัญหา ASR ดังนั้นวิธีแรกสุดที่ควรทำคือตรวจสอบมวลรวมโดยการวิเคราะห์เบื้องต้นว่ามีลักษณะทางแร่ที่มีแนวโน้มจะเกิดปัญหา ASR หรือไม่

การขยายตัวจากปฏิกิริยา ASR เกิดขึ้นเฉพาะกับมวลรวมบางชนิดและอาจไม่ได้เกิดเหมือนกันทุกก้อนเนื่องจากกระบวนการเกิดหินมีการหลอมเหลวแร่และเย็นตัวของแร่ที่ไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดผลึกที่ต่างชนิดกัน มีการเสนอแนวการแบ่งประเภทมวลรวมตามระดับการตอบสนองปฏิกิริยาดังนี้ (Swamy, 1992)

1. ประเภทตอบสนองการเกิดปฏิกิริยาได้ดีเช่น Opaline silica
2. ประเภทตอบสนองการเกิดปฏิกิริยาปานกลางเช่น Chalcedony ได้แก่ หิน Chert และหิน Flint
3. ประเภทตอบสนองการเกิดปฏิกิริยาบางครั้งเช่น Volcanic glass ได้แก่ หิน Basalt และหินRhyolite
4. ประเภทหินผลึกควอตซ์หรือหินที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ เป็นหินที่มีผิวบางส่วนเป็นร่องเล็กเช่น หิน Greywacke และหิน Hornfel

นักวิจัยบางกลุ่มอาจแบ่งตามรูปแบบของซิลิกาในมวลรวมที่เกิดปฏิกิริยา (Mindess *et al.*, 2003) ดังแสดงในตารางที่ 1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 1 รูปแบบของซิลิกาที่เกิดปฏิกิริยาในมวลรวมชนิดต่างๆ

แร่ธาตุที่เกิดปฏิกิริยา	ลักษณะทางกายภาพ	ลักษณะหินที่พบ	แหล่งที่ปรากฏ
Opal	Amorphous	Opaline limestonen(เช่น, Spratt limestone), chert, shale, flint	Common as a minor constituent in sedimentary rocks
Silicate glass	Amorphous	Volcanic glasses (rhyolite, andesite, dacite) and tuffs; synthetic glasses	Regions of volcanic origin; river gravels originating in volcanic areas
Chalcedony	crystalline-Micro Quartz	Siliceous limestones and sandstones, cherts and flints	Widespread
Cristobalite (tridymite)	Crystalline	,Opaline rocks fired ceramics	Uncommon
Quartz	Crystalline	Quartzite,sands,sandstones, many igneous and metamorphic rocks (เช่น granites and schists)	Common, but reactive only if highly strained or microcrystalline

ที่มา: Mindess *et al.* (2003)

ความซับซ้อนของมวลรวมในการเกิดปฏิกิริยา ASR นั้นมีปัจจัยหลายประการนอกจากประเภทมวลรวมแล้ว ยังมีรายละเอียดอื่นดังต่อไปนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สมบัติการสลายตัวของซิลิกา (Dissolution of Silica)

ซิลิกาสามารถละลายในกรดแก่หรือเบสแก่และทำให้ค่า pH ของสารละลายลดลง มีรายงานว่าความสามารถละลายได้นี้มีความสัมพันธ์กับระดับโครงสร้างความเป็นผลึก (Degree of Crystalline) ของซิลิกา (Grattan-Bellew, 2001) และก็มีการศึกษาที่บ่งชี้ว่าซิลิกาที่มีสถานะไม่เป็นผลึก (Amorphous) ในลักษณะผงละเอียดสามารถละลายได้ดีกว่าโครงสร้างที่เป็นผลึก (Dove and Rimstidt, 1994) ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาจึงมีปัจจัยหลายประการที่เกี่ยวข้องและควรนำมาพิจารณานอกจากด้านคุณภาพของผลึกตามธรรมชาติ (Broekmans, 2004)

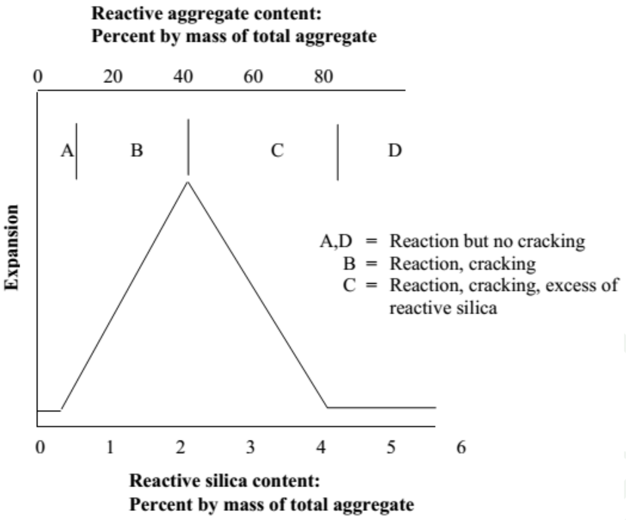
สมบัติของมวลรวม

สมบัติของมวลรวมโดยเฉพาะที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ASR นั้นขึ้นกับปริมาณซิลิกาที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ในมวลรวม โดยอาจแบ่งมวลรวมเป็น 2 ประเภท โดยหากการเกิดปฏิกิริยาของมวลรวมเกิดขึ้นภายใน 5-20 ปี อาจจัดอยู่ในพวกเกิดปฏิกิริยาเร็วหรือเกิดปฏิกิริยาปกติ (Fast, Normal Reactive) แต่หากการเกิดปฏิกิริยาของมวลรวมใช้เวลามากกว่า 15-20 ปีเรียกว่าเกิดปฏิกิริยาช้า (Slow-Late Reactive) หรือ ไม่เกิดปฏิกิริยา (Non-Reactive) (Lindgard *et al.*, 2010) การเกิดปฏิกิริยานี้ยังขึ้นกับสมบัติความซึมผ่านได้ของมวลรวม โดยมวลรวมที่พรุน มีความซึมผ่านสูง อัตราการเกิดปฏิกิริยาย่อมเพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากแอลคาไลสามารถเข้าถึงช่องว่างภายในได้ง่าย (St John, 1998; Broekmans, 2002)

พฤติกรรม Pessimum Effect

ลักษณะอีกอย่างหนึ่งของมวลรวมที่เกี่ยวข้องกับปัญหา ASR คือ พฤติกรรม Pessimum ของมวลรวมบางชนิดที่บ่งชี้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายตัวกับปริมาณซิลิกาที่เกิดปฏิกิริยาว่าไม่จำเป็นต้องเป็นเส้นตรงเสมอไปโดย การขยายตัวสูงสุดอาจเกิดจากปริมาณซิลิกาเฉพาะค่าที่เหมาะสมเรียกว่า The Pessimum (Grattan-Bellew, 2001) และพฤติกรรม Pessimum effect อาจเกิดเฉพาะกับมวลรวมบางชนิดและไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับปริมาณมวลรวม หากมีปริมาณหินที่ไวต่อปฏิกริยาในสัดส่วนที่เหมาะสมแล้ว ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ดี (Gillott, 1975; Hobbs, 1981) ดังภาพที่ 4 โดยที่ช่วงแรกปริมาณซิลิกามีจำนวนน้อยจึงมีการขยายตัวต่ำเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นโดยมีแอลคาไลมากพอ การขยายตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณซิลิกา เมื่อถึงจุดๆหนึ่ง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะลดลง ทำให้การขยายตัวน้อยลง ถึงแม้จะมีปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นก็ตาม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 4 ผลของปริมาณซิลิกาต่อปฏิกิริยา ASR

ที่มา: West (1996)

ขนาดและสัดส่วนคละ (Grading and size)

Stanton (1940) เคยรายงานว่ามวลรวมขนาด 170–600 ไมโครเมตร เกิดการขยายตัวได้มากกว่ามวลรวมขนาดใหญ่ และจากการทดสอบมวลรวมขนาด 20-125 ไมโครเมตร พบว่ามวลรวมขนาดเล็กเกิดการขยายตัวได้เร็วกว่ามวลรวมขนาดใหญ่ ทั้งนี้นักวิจัยเสนอข้อสรุปว่าหากมวลรวมมีผิวสัมผัสมากย่อมทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้มาก ดังนั้นมวลรวมรูปร่างขรุขระจึงจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่ามวลรวมที่ผิวเรียบกว่า เช่นเดียวกับที่มวลรวมละเอียดจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีเพราะเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก นอกจากนั้นการกระจายขนาดคละที่ดีของมวลรวมก็มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเช่นกันเนื่องจากทำให้มีพื้นที่สัมผัสสุทธิเพิ่มขึ้น (Diamond and Thaulow, 1974) ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกับผลทดสอบของ Lu *et al.* (Lu *et al.*, 2008) แต่อย่างไรก็ตาม มีข้อสรุปของ Multon และคณะ (Multon *et al.*, 2010) ที่แตกต่างออกไป โดยสรุปว่าขนาดมวลรวมที่เกิดปฏิกิริยาสูงนั้นนอกจากปัจจัยข้างต้นแล้วยังขึ้นกับลักษณะและองค์ประกอบโดยรวมของมวลรวม

การชะหรือปลดปล่อยแอลคาไล (Alkali Release)

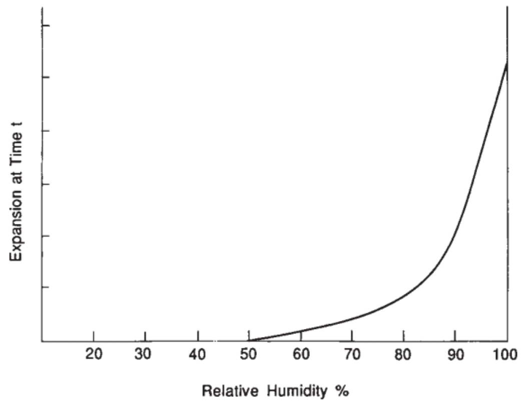
การชะหรือปลดปล่อยแอลคาไลจากมวลรวมบางชนิด ที่มีแร่ธาตุบางอย่างเช่น Micas, Clay Minerals, Alkali Feldspars, Zeolites และ Volcanic Glass จะค่อยๆปล่อยแอลคาไลออกมาสู่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารละลายในคอนกรีตเพิ่มขึ้น (Grattan-Bellew,1994;Berube *et al.*, 2000;Berube *et al.*, 2002) โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการปล่อยแอลคาไลคืออุณหภูมิ และระดับอุณหภูมิที่มีผลกระทบนี้จะแตกต่างกันตามชนิดของหิน, ความละเอียดและชนิดของสารละลาย (Lu *et al.*, 2006) จากรายงานพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการปล่อยแอลคาไลได้แก่ชนิดของ แร่ธาตุแอลคาไล อัตราส่วนของสารละลายกับมวลรวม ค่าpH และชนิดแอลคาไลไอออนในสารละลายตามลำดับ (Wang *et al.*, 2008) วิธีการหนึ่งที่ทดสอบการปล่อยแอลคาไลได้ง่ายที่สุดคือ การแช่มวลรวมในสารละลายพวกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Kawamura *et al.*, 2000;Berube *et al.*, 2000;Berube *et al.*, 2002) หรือใช้วิธีการสกัดด้วยน้ำร้อน (Berube *et al.*, 2000) ซึ่งรายงานการทดสอบหินชนิดต่างๆพบว่าปริมาณ Na_2O_{eq} ที่มีผลต่อการปล่อยแอลคาไลอยู่ในช่วง 0.45 ถึง 0.70 กิโลกรัมต่อหิน 1 ลูกบาศก์เมตร (Berube et al., 2000)

3. ความชื้น (Moisture)

ความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญของปฏิกิริยาและความเสียหายกล่าวคือเป็นตัวละลายแอลคาไล และยังมีผลต่อการดูดซับของเจลได้ทำให้ผลิตภัณฑ์ ASR gel จากปฏิกิริยาเกิดการขยายตัว จากการศึกษาพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา ASR จะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ของคอนกรีต โดยความชื้นที่ต่ำกว่า 70 %RH มีการขยายตัวเล็กน้อย แต่ที่สูงกว่า 80 %RH การขยายตัวจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (Swamy, 1992) ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับความชื้นสัมพัทธ์

ที่มา: Swamy (1992)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

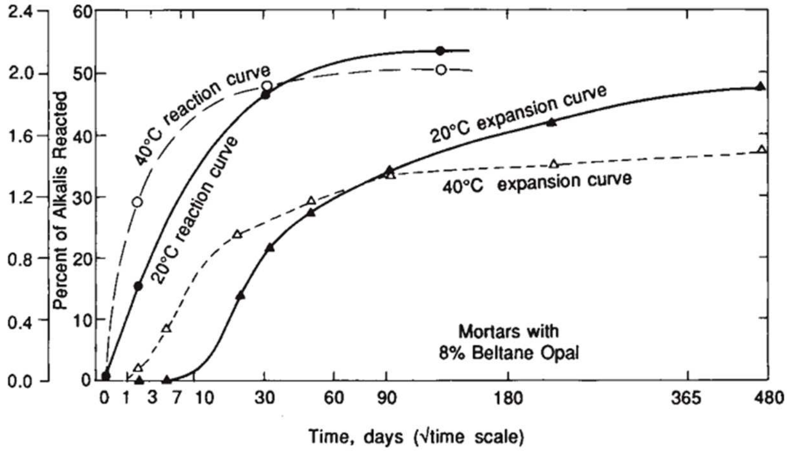
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

หากคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง จะทำให้มีช่องว่างสูง และทำให้น้ำซึมผ่านเนื้อคอนกรีตได้ดี ซึ่งมีผลกระทบทำให้แอลคาไลสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายและเกิดปฏิกิริยา ASR ง่าย (Yang *et al.*, 2005) แต่หากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำจะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความแน่นขึ้น ทำให้การส่งผ่านไอออนในสารละลายลดลง และจะทำให้การปลดปล่อยแอลคาไลลดลง (Wang *et al.*, 2008) และมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ASR ลดลง แต่อาจไม่เป็นเช่นนี้เสมอไป นักวิจัยบางกลุ่มตั้งข้อสังเกตว่า หากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำจะทำให้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมีความเป็นผลึกลดลง (Slamecka and Skvara, 2002) และสารละลายมีปริมาณ OH^- มากขึ้น (Stark *et al.*, 2008) ส่งผลให้ ค่าpH เพิ่มสูงขึ้นทำให้มวลรวมปล่อยแอลคาไลเพิ่มขึ้นด้วย จึงมีการสลายตัวของซิลิกาที่เพิ่มขึ้นและเกิดปฏิกิริยา ASR มากขึ้น ซึ่งความเห็นดังกล่าวยังเป็นข้อถกเถียงอยู่

เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงขึ้นจะทำให้คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้นและการส่งผ่านไอออนจะเกิดรุนแรงและง่ายขึ้นดังที่กล่าวมาแล้ว และยังทำให้อัตราการชะแอลคาไลเพิ่มขึ้นด้วย (Kamali *et al.*,2003; Kamali *et al.*, 2008) กลไกเหล่านี้ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ASR ให้เร็วขึ้น และมีงานวิจัยที่บ่งชี้ว่าความชื้นภายนอกจะส่งผลกับคอนกรีตส่วนบริเวณผิว (Stark, 1991; Sellevold, 1993) และเมื่อลึกลงไปในคอนกรีตความชื้นภายนอกจะมีผลลดลง (Yang *et al.*, 2005) และทำให้การซึมผ่านไอออนลดลงตามความลึกจากผิว ดังนั้นอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะเป็นตัวกำหนดความชื้นภายในของคอนกรีต และมีผลกระทบมากกว่าผลจากสภาวะภายนอก (Stark, 1995)

นอกจากนั้นอุณหภูมิยังผลกระทบต่อการเกิด ASR ดังนี้ หากอุณหภูมิสูงการขยายตัวจะเร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่าในระยะแรก แต่ในระยะยาวแล้วอุณหภูมิต่ำจะมีผลต่อการขยายตัวเท่ากับและมากกว่าอุณหภูมิสูง (Swamy, 1992) ซึ่งสอดคล้องกับกราฟที่แสดงถึงต่อปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 6

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดปฏิกิริยากับระยะเวลาที่อุณหภูมิ 20และ 40 °C

ที่มา: Diamond *et al.* (1981) อ้างถึง Swamy (1992)

การทดสอบและตรวจสอบปฏิกิริยา ASR

ในโครงสร้างที่เสียหายจากปฏิกิริยา ASR การตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีต ทั่วไปมักใช้การสังเกตรอยแตกร้าว ซึ่งอาจเกิดในลักษณะของ Map-Cracking แต่ก็อาจไม่เป็นเช่นนี้เสมอไปหากโครงสร้างมีเหล็กเสริมหนาแน่นหรือมีการยึดรั้งลักษณะอื่น นอกจากนั้นยังอาจสังเกตจาก ASR Gel ที่ซึมออกมาตามรอยแตกร้าว

การทดสอบการเกิดปฏิกิริยา ASR ของมวลรวมอาจแบ่งได้เป็น 5 ลักษณะ ดังตารางที่ 2 ซึ่งจะแตกต่างกันไปในรายละเอียดของแต่ละมาตรฐาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 2 วิธีการทดสอบปฏิกิริยา ASR ของมวลรวม

วิธีทดสอบ	RILEM	ASTM Standard	Canadian Standard	British Standard
Petrographic Examination	AAR-1	ASTM C295	-	BS 812:Part 104
Accelerated Mortar Bar Test (AMBT)	AAR-2	ASTM C1260	CSA A23.2-25A	DD 249: 1999
Concrete Prism Test (CPT)	AAR-3	ASTM C1293	CSA A23.2-14A	BS 812:Part 123
Accelerated Concrete Prism Test (ACPT)	AAR-4	-	-	-
Chemical Method	-	ASTM C289	-	-

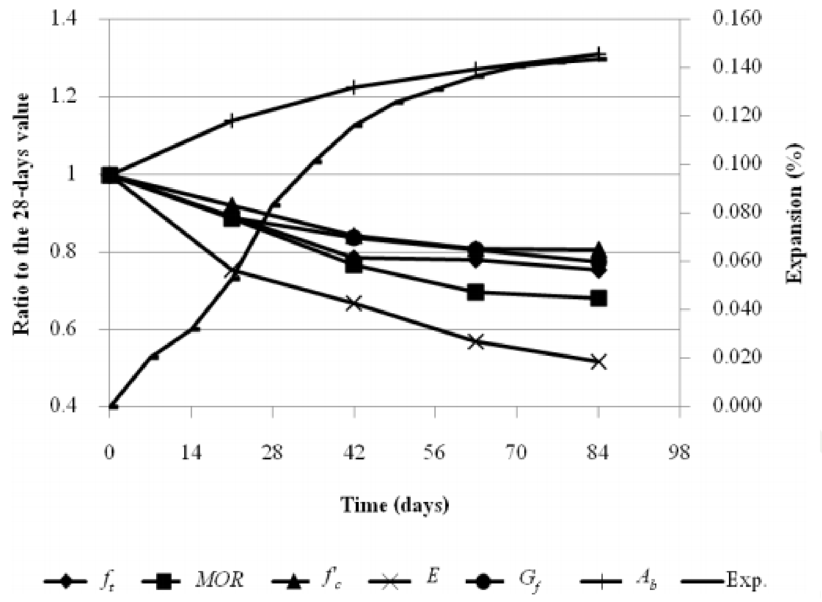
การทดสอบส่วนใหญ่เป็นทดสอบการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างซึ่งเป็นผลกระทบจากการขยายตัวของ ASR gel โดยทำให้คอนกรีตเสียความเป็นเนื้อเดียวกันจากการแตกร้าว นำไปสู่การสูญเสียความคงทนของคอนกรีต แต่การขยายตัวของ ASR gel ยังผลกระทบต่อสมบัติทางกลต่างๆ ของคอนกรีตได้อีกด้วย

ผลกระทบเนื่องจากปฏิกิริยา ASR ต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต

การดูดซับความชื้นเป็นสมบัติของ ASR gel ที่ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นจากการขยายตัวของเจลในเนื้อคอนกรีต เกิดความเครียดภายใน ทำให้เกิดแรงดันขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวในเนื้อคอนกรีตและสมบัติเชิงกลต่างๆของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีความสำคัญต่อความสามารถรับกำลังของโครงสร้างและมักใช้เป็นพารามิเตอร์ในการประเมินความเสียหายต่อโครงสร้างคอนกรีต

ศุภชัย (2555) ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ได้รับผลกระทบจาก ASR (ศุภชัย, 2555) ในสภาพแวดล้อมธรรมดา และสภาวะเร่งปฏิกิริยา และรายงานว่าคอนกรีตมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลหลายประการดังภาพที่ 7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



โดยที่ f_t Splitting tensile strength, f'_c Compressive strength,
MOR Modulus of rupture, E Modulus of elasticity,
G_f Fracture energy, A_b Water absorption, Exp. Expansion

ภาพที่ 7 สมบัติเชิงกลและการขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้หินไรโอไลต์เทียบกับเวลา

ที่มา: ศุภชัย (2555)

เมื่อคอนกรีตที่ใช้มวลรวมท้องถิ่น Rhyolite และเกิดปัญหา ASR มีการขยายตัว สมบัติเชิงกลของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไป โดยพารามิเตอร์ที่มีค่าลดลงมากที่สุดคือค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตซึ่งลดลงมากถึงเกือบ 50 เปอร์เซนต์ รองมาคือค่าโมดูลัสการแตกร้าวที่ลดลงไปประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่ากำลังรับแรงอัดลดลงน้อยสุดที่ประมาณ 20 เปอร์เซนต์ (ศุภชัย, 2555) ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบของ Sargolzahi และคณะ (Sargolzahi *et al.*, 2010) ที่ทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่มีปัญหา ASR ปรากฏว่าได้ผลใกล้เคียงกับการทดสอบก่อนหน้านี้ ว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเป็นพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงมากที่สุดสำหรับปฏิกิริยา ASR สอดคล้องกับข้อมูลของ Chotickai (2013) ที่ให้ตัวเลขคร่าวๆว่า เมื่อคอนกรีต ASR ขยายตัว 2 เปอร์เซนต์ ค่ากำลังรับแรงดึงจะลดลงประมาณ 50 เปอร์เซนต์ และค่ากำลังรับแรงอัดจะลงลงประมาณ 25 เปอร์เซนต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นักวิจัยหลายรายก่อนหน้านี้ ได้ศึกษาสมบัติทางกลของคอนกรีต ASR ซึ่งให้ผลในลักษณะเดียวกัน (Swamy and Al-Asali, 1988) โดยที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความเสียหายของคอนกรีตเนื่องจากปฏิกิริยา ASR ได้ไวที่สุด

ผลกระทบทั้งการขยายตัวจนนำไปสู่การเสียความคงทนและการเสียสมบัติทางกลบางประการของคอนกรีต จะทำให้โครงสร้างคอนกรีตมีความปลอดภัยลดลงและเสียสภาพการใช้งานไปในที่สุด การแก้ไขในปัจจุบันยังทำได้ค่อนข้างยาก มีความไม่แน่นอน และมีราคาแพง การป้องกันจึงเป็นแนวทางที่ดีที่สุดสำหรับการรับมือจากปัญหาปฏิกิริยา ASR ในโครงสร้างคอนกรีตใหม่ในอนาคต

การป้องกันและลดการเกิดปฏิกิริยา ASR

แนวคิดสำหรับการป้องปฏิกิริยา ASR โดยทั่วไปมีอยู่ 5 วิธี (Broekmans, 2013)

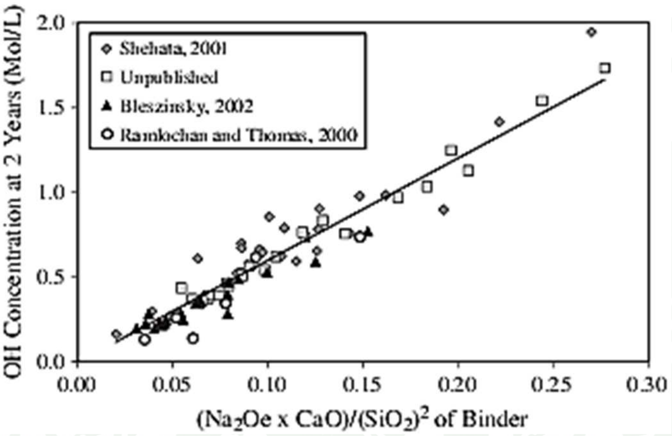
1. การใช้วัสดุมวลรวมที่ไม่เกิดปฏิกิริยา ASR ในส่วนผสมคอนกรีต
2. การลดปริมาณแอลคาไลน์ (โซเดียมและโพแทสเซียม) ในส่วนผสมคอนกรีต เช่นกำหนดปริมาณแอลคาไลในปูนซีเมนต์หรือในสารผสมเพิ่มหรือในน้ำ เป็นต้น
3. การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยวัสดุปอซโซลาน เพื่อเพิ่มคุณสมบัติที่ช่วยป้องกันความเสียหายจากปฏิกิริยา ASR
4. การเติมสารผสมเพิ่มชนิดเคมียับยั้ง เช่น เกลือลิเทียม เป็นต้น
5. ลดความชื้นที่จะเข้าถึงภายในคอนกรีต

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการใช้วัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ (Supplementary Cementitious Materials, SCMs) เพื่อป้องกันปัญหาจาก ASR โดย SCMs นั้นได้รับความสนใจและมีรายงานการศึกษาประสิทธิภาพของสารชนิดต่างๆเป็นจำนวนมากดังต่อไปนี้

งานวิจัยหลายฉบับในประเทศบ่งชี้ว่า SCMs จากแหล่งในประเทศสามารถควบคุมการขยายตัวของคอนกรีตที่มีปัญหา ASR ได้ (Sangsuwan and Sujjavanich, 2011; วุฒินันท์และสุวิมล , 2557; Wongtanasarasin and Sujjavanich, 2014; รังสรรค์และสุวิมล, 2557) โดย SCMs มีหน้าที่หลักคือลดความเป็นด่างของสารละลายในโพรงคอนกรีต SCMs จะช่วยยึดกับแอลคาไลในได้ดีขึ้น นอกจากนั้น SCMs ส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่มี Ca^{2+} ต่ำและมีซิลิกาสูง จึงมีประสิทธิภาพสูงในการลดการขยายตัวจาก ASR (Thomas *et al*., 2004, 2007) Lindgard และคณะ (2012) ได้วิเคราะห์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ซีเมนต์เพสต์และพบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้น OH^- ในสารละลายในซีเมนต์เพสต์กับค่าดัชนีเคมี "Chemical Index" ($[Na_2O_{eq} \times CaO]/(SiO_2)^2$) ของวัสดุประสาน" ดังแสดงในภาพที่ 8 มีข้อสังเกตว่า SCMs ที่มีปริมาณซิลิกาสูง ปริมาณแอลคาไลและ CaO ต่ำ จะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการป้องกันการขยายตัวตัวเนื่องจาก ASR ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าหากความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนต่ำ ก็จะลดโอกาสหรือความเสี่ยงจากการขยายตัว ASR มีการระบุตัวเลขคร่าวๆว่าความเข้มข้นของไฮดรอกซิลที่ต่ำควรอยู่ในช่วง 200-300 มิลลิโมลต่อลิตร (Thomas *et al*., 2006; Rivard *et al*., 2003) อย่างไรก็ดีข้อสังเกตนี้อาจไม่เป็นไปตามนี้เสมอไปเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของมวลรวมแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมาก

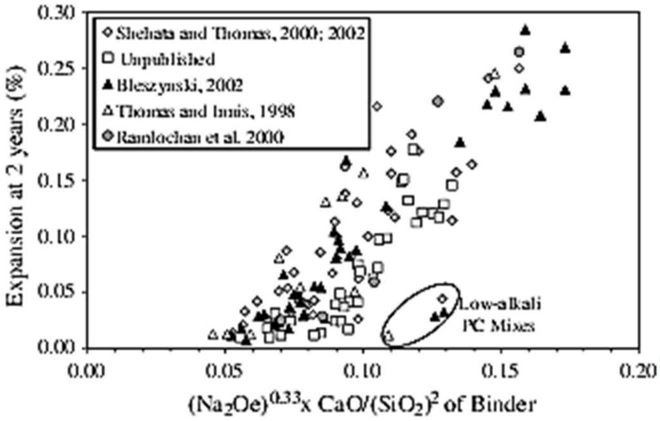


ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ OH^- ในสารละลายกับองค์ประกอบ ทางเคมีของปูนซีเมนต์

ที่มา: Lindgard *et al*. (2012)

งานวิจัยอีกหนึ่งชิ้นของ Thomas และคณะ (2011) ยืนยันข้อสรุปที่กล่าวข้างต้น โดยนักวิจัยได้ศึกษาเพิ่มเติมความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของคอนกรีตปริซึมตามวิธีทดสอบ ASTM C1293 กับค่าดัชนีเคมี ($[(Na_2O_{eq})^{0.33} \times CaO]/(SiO_2)^2$) ดังภาพที่ 9 (Thomas *et al*., 2011) โดยวัสดุที่ใช้การผลิตคอนกรีตนั้นก็เป็นวัสดุประเภทเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบครั้งก่อน (Thomas *et al*., 2007) และปรากฏว่าผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน โดยการขยายตัวจะแตกต่างกับการทดสอบครั้งก่อนเล็กน้อยเนื่องจากมีแอลคาไลถูกชะจากมวลรวมในสารละลายระหว่างการทดสอบด้วย จากการทดสอบซีเมนต์เพสต์และคอนกรีตปริซึมทั้งสองของ Thomas ทำให้อาจสรุปได้ว่าแอลคาไลที่ถูกชะจากมวลรวมมีปริมาณไม่มากเมื่อเทียบกับแอลคาไลจากปูนซีเมนต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 9 ผลการขยายตัวกับองค์ประกอบ ทางเคมีในรูปของดัชนีเคมีของปูนซีเมนต์

ที่มา: Lindgard *et al*. (2012)

นอกจากนี้ SCMs ยังส่งผลในด้านการใช้แทนปูนซีเมนต์ที่ลดลง ซึ่งทำให้อัตราการปล่อยแอลคาไลน้อยลง และค่า pH ของสารละลายลดลงเพราะปริมาณ $Ca(OH)_2$ ในซีเมนต์เพสต์ลดลง ความทึบแน่นที่เพิ่มขึ้นจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิคมีผลต่อการลดการซึมผ่านของน้ำ และต้านทานการแตกร้าวจากการเพิ่มกำลังของคอนกรีต (Glasser, 1992) การลดการซึมผ่านของน้ำทำให้การเคลื่อนที่ของไอออนลดลง จะทำให้ลดการเกิดปฏิกิริยา ASR แต่อาจมีปัญหา Self-Desiccation ที่ขึ้นได้

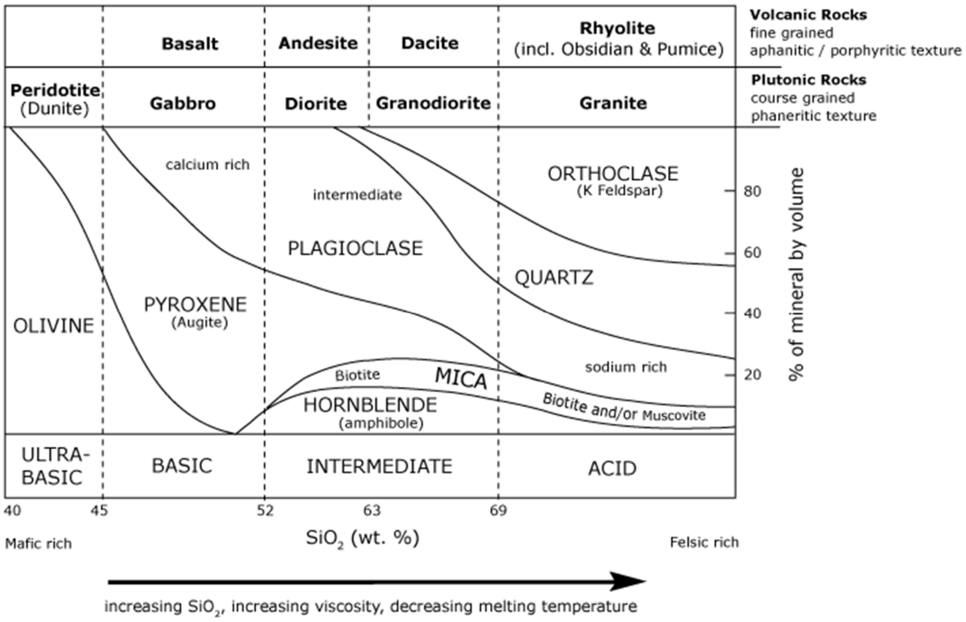
รายงานวิจัยของ Thomas และคณะ (2011) สรุปว่าปฏิกิริยา ASR มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reactions) โดยที่ปฏิกิริยาปอซโซลานิกจาก SCMs เกิดขึ้นก่อนปฏิกิริยา ASR ทำให้มีปริมาณ $Ca(OH)_2$ น้อยลงและผลิตภัณฑ์ที่เกิดจะมี Ca/Si ต่ำ ในโพรงคอนกรีตมี Ca/Si ต่ำทำให้ ASR gel มีโอกาสเกิดได้น้อยลง และผลิตภัณฑ์ C-S-H จากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นจะทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงและทำให้ต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากการขยายตัวของ ASR gel ได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ไรโอไลต์ (Ryolite)

มวลรวมเป็นวัสดุที่สำคัญสำหรับโครงสร้างคอนกรีต มวลรวมที่เหมาะสมแก่การใช้งานต้องมีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่นมีความคงทนต่อการขัดสี ความแกร่งสูง รับกำลังรับแรงอัดได้สูง ความซึมน้ำต่ำ ผิวมีการจับเกาะกับซีเมนต์ดี และมีปริมาณอินทรีย์สารในเนื้อหินต่ำ มวลรวมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้แก่หินไรโอไลต์ซึ่งเป็นหินภูเขาไฟสีเทา เนื้อละเอียด ซึ่งโดยทั่วไปมักมีส่วนประกอบทางแร่ประกอบด้วยแร่ Orthoclase 50%, Quartz 25%, Plagioclase Feldspar และ Ferromagnesian รวม 25% ดังแสดงในภาพที่ 10 โดยมีผิวแบบ Fine-Grained และ Glassy Texture มักประกอบด้วยผลึกดอก Phenocryst เห็นได้ด้วยตาเปล่า (ประทีป ดวงเดือน, 2531) ในประเทศไทยนิยมใช้หินไรโอไลต์ในลักษณะเป็นวัสดุก่อสร้างในท้องถิ่น (Local Materials)

Rhyolite นั้นพบได้ในหลายจังหวัดในประเทศไทย พบมากแถวจังหวัดสระบุรี ลพบุรี แพร่ และเลย (กรมทรัพยากรธรณี, 2544) และสามารถใช้สำหรับก่อสร้างได้ อย่างไรก็ตามมีรายงานการศึกษาว่า Rhyolite มีแนวโน้มการเกิด ASR ได้ (สุวิมล และคณะ, 2555; ศุภชัย, 2555; วัชรากร, 2557)



ภาพที่ 10 ส่วนประกอบทางแร่ของหิน

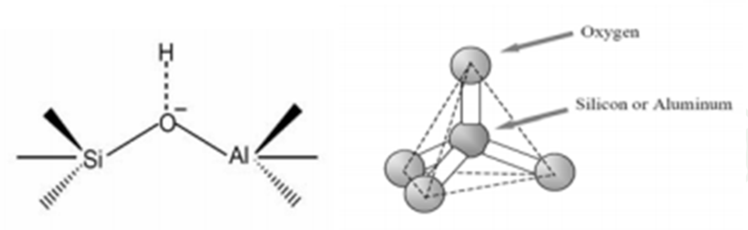
ที่มา: The University of Auckland (2013)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ซีโอไลท์ (Zeolite)

ซีโอไลท์ หรือ แร่ภูเขาไฟ มาจากคำในภาษากรีกคือ *'zeo'* และ *'lithos'* ซึ่งมีความหมายว่า'to boil' และ 'a stone' เพราะเมื่อซีโอไลต์ได้รับความร้อน จะพบการระเหยของน้ำได้อย่างชัดเจน ซีโอไลท์คือกลุ่มของหินเดือดเป็นหินที่ผ่านความร้อนสูงมากจนสุกและขยายตัวเรียบร้อยแล้ว (Szostak, 1998)

โครงสร้างของซีโอไลท์ เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Crystalline Aluminosilicates) มีโครงสร้างหลักที่ประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอนหรืออะลูมิเนียม 1 อะตอมอยู่ตรงกลาง และล้อมรอบด้วยออกซิเจน 4 อะตอมที่มุมทั้งสี่ (SiO_4 หรือ AlO_4) SiO_4 และ AlO_4 จะสร้างพันธะกันเป็นรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedron) โดยใช้ออกซิเจนร่วมกันดังภาพที่ 11 เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและมีช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลท์เป็นผลึกแข็งแต่มีรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ มีขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม และโดยรอบโครงสร้างของซีโอไลท์จะมีไอออนบวกและน้ำอยู่ในโครงสร้าง



ภาพที่ 11 โครงสร้างทางเคมีและโครงสร้างพื้นฐานของซีโอไลท์

ที่มา: Georgiev *et.al* (2009)

ซีโอไลท์มีสูตรของส่วนประทั่วไปคือ $M_{2/n}O.Al_2O_3.xSiO_2.yH_2O$ (ศิรินุช, 2556)

โดยที่ n คือประจุของไอออนบวก M

x+y คือจำนวนหน่วยเททระฮีดรอลต่อหน่วยเซลล์

y/x คืออัตราส่วน Si/Al

ลักษณะที่เป็นจุดเด่นของซีโอไลท์สามารถอธิบายได้ดังนี้ เนื่องจากซีโอไลท์มีลักษณะโครงสร้างแบบเปิด ประกอบด้วยช่องว่างและการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลจำนวนมาก ซึ่งมีประจุบวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

และโมเลกุลของน้ำเกาะอยู่ภายใน ทำให้มีคุณสมบัติแลกเปลี่ยนกับแคทไอออนอื่นได้ (Ion exchange) และยังมีสมบัติการสูญเสียน้ำแบบเปลี่ยนกลับได้ (Reversible Dehydration) รวมถึงมีความสามารถเป็นวัสดุกรองที่ละเอียด (Molecular Sieves) ที่ทำให้มีสมบัติต่างจากสารดูดซับอื่น

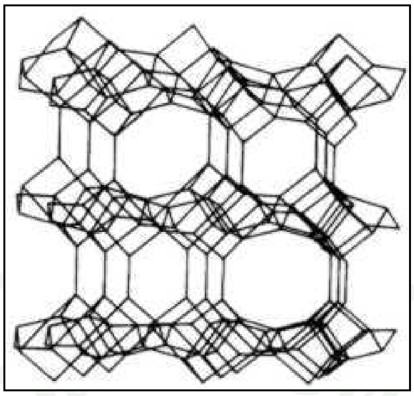
ซีโอไลท์ มี 2 กลุ่ม คือซีโอไลท์ธรรมชาติ (Natural or Mineral Zeolite) และซีโอไลท์สังเคราะห์ (Synthetic Zeolite) ซีโอไลท์แต่ละชนิดในแต่ละกลุ่มมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน

ซีโอไลท์ธรรมชาติมักพบในการทำเหมืองแร่ ซีโอไลท์ชนิดนี้เป็นกลุ่มของผลึกอะลูมิโนซิลิเกตของเบส ซึ่งอาจมีการสูญเสียน้ำบางส่วนหรือทั้งหมด แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ซีโอไลท์ธรรมชาติสามารถพบหลายรูปแบบ เช่น Mordenite, Stellerite, Thomsonite, Analcime, Clinoptilolite, Chabazite, Gmelinite เป็นต้น ดังแสดงภาพที่ 12 โดยตัวอย่างหนึ่งที่มีการใช้งานมากคือ Clinoptilolite มีลักษณะโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 13 ในระยะแรกมีการนำซีโอไลท์ธรรมชาติมาใช้ในการก่อสร้าง หรือใช้เป็นวัสดุกรอง ในอุตสาหกรรมกระดาษ ต่อมาภายหลังได้ค้นพบสมบัติการเป็น Molecular Sieves และ ion exchange จึงได้นำมาใช้เป็น Molecular Sieves Adsorbent ในอุตสาหกรรมแยกก๊าซธรรมชาติและแยกแอมโมเนียในขบวนการกำจัดน้ำทิ้ง

ภาพที่ 12 ตัวอย่างซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดต่างๆ

ที่มา: ไพศาลและเมตตา (2556)

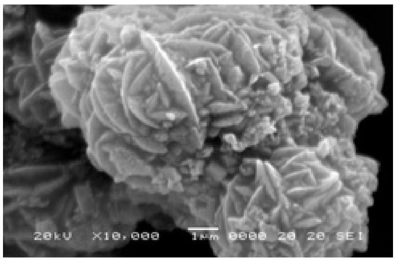
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 13 โครงสร้างซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด Clinoptilolite

ที่มา: Manley and Holmes (1989)

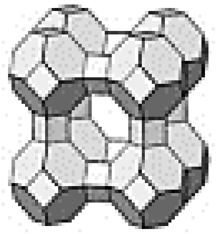
ซีโอไลท์สังเคราะห์เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาเพื่อนำข้อดีของซีโอไลท์ธรรมชาติมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆโดยลดข้อด้อยลงด้วย เนื่องจากซีโอไลท์ธรรมชาติมีความหลากหลายของประเภท ชนิด และโครงสร้าง ทำให้มีปัญหาความไม่แน่นอนต่อการนำไปใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพ จึงทำให้มีการพัฒนาวัสดุโดยใช้กระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลท์ขึ้นเพื่อการใช้ประโยชน์เฉพาะด้านเช่นเป็นวัตถุดิบตั้งต้นของอุตสหกรรมผงซักฟอกหรือใช้ในการกำจัดของเสียในโรงงานเป็นต้น ซีโอไลท์สังเคราะห์เกิดจากการทำปฏิกิริยาเบสของออกไซด์ต่างๆ เช่น Al_3O_2 SiO_2 Na_2O และ K_2O ทำปฏิกิริยาในน้ำและเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของซีโอไลท์ที่มีผลึก และการใช้กระบวนการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันสามารถทำให้เกิดซีโอไลท์หลายลักษณะตั้งแต่มีลักษณะเป็นเจล (Gelatin) จนถึงรูปที่เป็นรูพรุน (Porous) และลักษณะที่คล้ายเม็ดทราย (Sandlike) เช่น Zeolite Y (ภาพที่ 14), Zeolite A (ภาพที่ 15), Zeolite F, Zeolite M เป็นต้น



ภาพที่ 14 ตัวอย่างซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Zeolite Y

ที่มา: ไพศาลและเมตตา (2556)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 15 โครงสร้างซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Zeolite A

ที่มา: Georgiev *et.al* (2009)

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity) หรือ CEC เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการการแลกเปลี่ยนประจุบวก ซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญของซีโอไลต์ โดยบอกถึงความสามารถของสารต่างๆในการจับยึดและแลกเปลี่ยนไอออนบวก หากสารนั้นมีอนุภาคเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักมาก และสามารถดูดยึดประจุบวกไว้ที่ผิวได้ด้วยแรงสูงพอสมควรและทนทานต่อการชะล้างของน้ำ แต่ในขณะเดียวกันก็สามารถถูกไล่ที่ให้ย้ายออกหรือหลุดโดยไอออนอื่นที่เป็นอิสระอยู่ในสารละลายได้ ปริมาณไอออนบวกที่ดูดซับสามารถวัดได้โดยคิดจำนวนเป็น Milliequivalent ต่อน้ำหนัก 100 กรัมอบแห้ง คุณสมบัตินี้เรียกว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (CEC) ในการแลกเปลี่ยนระหว่างประจุบวกของสารกับประจุบวกในสารละลายนั้นจะเกิดขึ้นง่ายหรือยากจะแตกต่างกันออกไปขึ้นกับลักษณะ 4 ประการ คือ (มัณฑนีย์, 2554)

1. ชนิดของประจุบวกที่ถูกดูดยึดที่ผิวและประจุบวกที่แทนที่ (Adsorbed Cation และ Replacing Cation)

1.1 ขนาดของประจุบวกที่ถูกดูดซับ (Adsorbed Cation) ในสภาพที่เกิดปฏิกิริยากับน้ำแล้ว (Hydrated size) ประจุจะถูกดูดซับด้วยแรงเท่าไหร่ หรือสามารถแทนที่ได้หรือไม่ จะเป็นไปตามกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) โดยขนาดประจุบวกเดี่ยว (Monovalent) และประจุบวกสอง (Divalent) จะเรียงลำดับจากขนาดของประจุใหญ่ไปเล็กได้ดังนี้

Monovalent $Li^{+} > Na^{+} > K^{+} = NH_4^{+} > Rb^{+}$

Divalent $Mg^{+2} > Ca^{+2} > Sr^{+2} > Ba^{+2}$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดังนั้นเมื่อ Na^+ มีขนาดใหญ่กว่า K^+ จะถูกดูดซับกับอนุภาคด้วยแรงที่น้อยกว่า K^+ ทำให้ Na^+ ถูกแทนที่ที่ได้ง่ายกว่า K^+ หรือ NH_4^+

1.2 ประจุบวกที่แทนที่ (Replacing Cation) ในสารละลายมีประจุที่มีอำนาจการแทนที่ (Replacing power) ที่แตกต่างกันออกไป ดังนี้คือ $Al^{3+}=H^+>NH_4^+>Ca^{2+}>Mg^{2+}>K^+>Na^+>Li^+$ หมายความว่า K^+ สามารถแทนที่ Na^+ กับ Li^+ ได้ การจัดเรียงการแทนที่นี้ อาศัยหลักขนาดของประจุบวกที่ปฏิกิริยากับน้ำแล้ว โดยประจุบวกที่มีขนาดเล็กจะมีอำนาจการแทนที่สูงเมื่อมีวาเลนซีเท่ากัน และ ประจุบวกที่มีวาเลนซ์สูงมีอำนาจการแทนที่สูง และสามารถดูดซับกับอนุภาคด้วยแรงสูงกว่าประจุบวกที่มีวาเลนซ์ต่ำ เช่น $Al^{3+}>Ca^{2+}>Na^+$ เป็นต้น

2. ความเข้มข้นของประจุ หากการแลกเปลี่ยนประจุเป็นไปตามหลักข้อ 1 ที่ประจุขนาดใหญ่สามารถแทนที่ประจุขนาดเล็กได้ (Force action) แต่หากปริมาณความเข้มข้นของประจุขนาดเล็กมีมาก จะสามารถเข้าแทนที่ประจุขนาดใหญ่ให้หลุดออกมาได้ ซึ่งเป็นไปตามหลักแรงกระทำของมวล (Mass action)

3. การอิ่มตัว (Degree of saturation) การอิ่มตัวของประจุบวกบางชนิดบนผิวของอนุภาคมีผลต่อความสามารถที่ประจุบวกนั้นจะถูกแทนที่ออกได้มาก เช่น เมื่อมี Ca^{2+} ดูดซับอยู่ที่ผิวน้อยเท่าไรก็จะมีความยากที่ประจุ Ca^{2+} จะถูกแทนที่และกำจัดออกจากผิวทั้งหมดยากขึ้นเท่านั้น ซึ่งต่างจาก Na^+ ที่หากดูดซับบนผิวน้อยเท่าใด ยิ่งง่ายต่อการแทนที่มากขึ้นเท่านั้น และประจุบวกบางชนิด เช่น K^+ , Mg^{2+} จะไม่ขึ้นกับปริมาณการอิ่มตัว

4. ประจุบวกอื่น ๆ ที่อยู่ร่วมกันบนผิวอนุภาค (Complementary exchangeable cations) ประจุบวกที่อยู่บนผิวของอนุภาค ร่วมกับประจุบวกที่ต้องการแทนที่มีบทบาทสำคัญต่อการแทนที่ไม่เหมือนกัน เช่น ถ้า K^+ อยู่ร่วมกับ Al^{3+} หรือ H^+ บนผิวอนุภาค K^+ จะถูกแทนที่ออกมาง่าย แต่ถ้า K^+ อยู่ร่วมกับ Ca^{2+} K^+ จะถูกแทนที่ยากขึ้น

กลไกการป้องกันปฏิกิริยา ASR ของซีโอไลท์

การใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติป้องกันการขยายตัวจากปฏิกิริยา ASR โดยอาศัยการลดความเข้มข้นของแอลคาไลในสารละลายผ่านการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) การดูดซับความชื้น (Absorption) การเกิดและปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) (Feng and Hao, 1998)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ซึ่งมีผลต่อการป้องกันการก่อตัวของ ASR gel โดยเมื่อซีโอไลท์อยู่ในสารละลายกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แล้ว Na^+ จะเข้าไปแทนที่ประจุบวกในโครงสร้างของซีโอไลท์ ทำให้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ลดลง ส่งผลให้ความเป็นแอลคาไลและ ค่าpH ลดลง และการใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติร่วมในส่วนผสมคอนกรีตยังส่งผลต่อความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตด้วย จากปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Feng and Hao, 1998)

จากสมบัติดังกล่าวจึงมีการใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติในการป้องกันการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยา ASR เช่นการศึกษาของ Ahmadi และ Shekarchi (2010) พบว่าการใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติ (Clinoptilolite) และเถ้าลอยจากอิหร่านทดสอบแทนที่ปูนซีเมนต์ในสัดส่วน 5, 15, 25 และ 40 เปอร์เซนต์ ซีโอไลท์ธรรมชาติสามารถลดการขยายตัวได้ดีโดยเฉพาะเมื่อใช้แทนที่ซีเมนต์ในปริมาณค่อนข้างสูงคือตั้งแต่ 20 เปอร์เซนต์ขึ้นไป ดังภาพที่ 16 และให้ข้อสรุปว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์และเถ้าลอย 20 เปอร์เซนต์เป็นต้นไปสามารถลดการขยายตัวที่อายุ 16 วันจนผ่านเกณฑ์ ASTM ซึ่งกำหนดไว้ที่ 0.10% ดังภาพที่ 17 เช่นเดียวกับการทดลองของ Feng และคณะ (Feng *et al*., 2003) ที่ใช้ซีโอไลท์ลดการขยายตัวโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ 20 และ 25 เปอร์เซนต์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้ซีโอไลท์ธรรมชาตินั้นต้องใช้ในปริมาณสูง (20-40%)

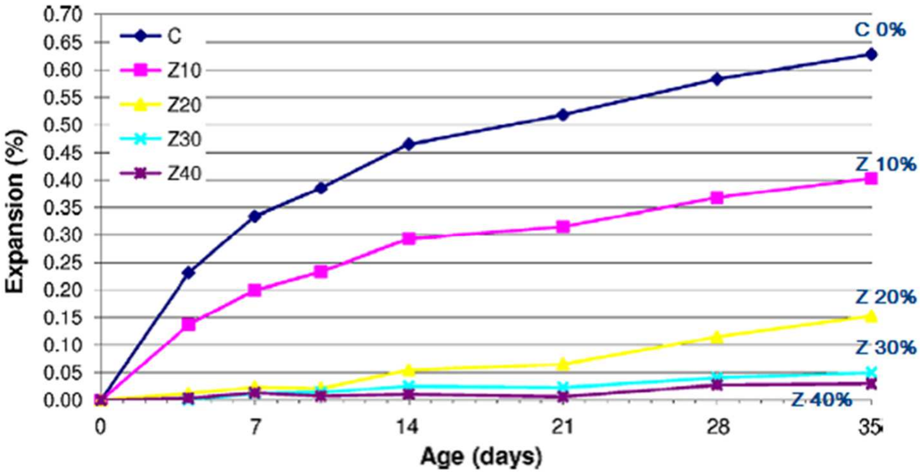
อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยการใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณน้อย (5-15%) สามารถลดการขยายตัวได้อย่างมาก (Niu and Feng, 2005) ดังภาพที่ 18 ที่การแทนที่ปูนซีเมนต์เพียง 5 เปอร์เซ็นต์ การขยายตัวก็ลดลงเป็นอย่างมาก ทั้งนี้ซีโอไลท์ที่ใช้มีการปรับปรุงคุณภาพ โดยการแช่ในสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 2 นอร์มอลิตี้ เป็นเวลา 4 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้ ขณะเดียวกันมีงานวิจัยบางชิ้นที่แสดงว่า ค่า CEC มีผลกระทบต่อการขยายตัว เช่นงานวิจัยของ Hao (2008) ที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติการขยายตัวเนื่องจาก ASR กับค่า CEC และพบว่าค่า CEC ที่สูงกว่า 30 m.mol/100g สามารถลดการขยายตัวเนื่องจาก ASR ได้ ดังภาพที่ 19

หลักการใช้ประโยชน์จากค่า CEC หรือสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนนี้มีพื้นฐานการทำปฏิกิริยาของซีโอไลท์กับแอลคาไลในสารละลายของส่วนผสม ทำให้ปริมาณแอลคาไลที่จะทำปฏิกิริยากับมวลรวมลดลงโดยไปจับยึดอยู่ในซีโอไลท์แทน ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2 ดังนี้

$$\text{M.Zeolite (s)} + Na^+ \text{(aq)} \quad \leftrightarrow \quad \text{Na.Zeolite} + M^+ \text{(aq)} \qquad (2)$$

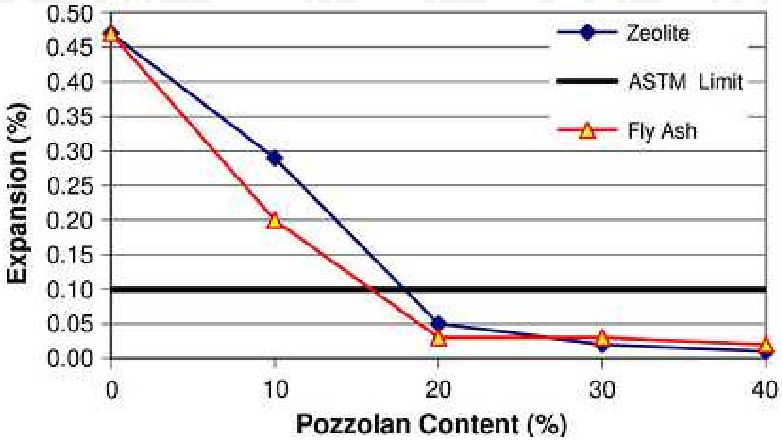
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การที่โซเดียมไอออนจะแลกเปลี่ยนประจุกับธาตุหมู่โลหะภายในโครงสร้างซีโอไลท์นั้น ขึ้นกับปัจจัยหลายดังกล่าวข้างต้น แต่อย่างไรก็ตามการแลกเปลี่ยนไอออนตามสมการนี้ ก็สามารถผันกลับได้หากความเข้มข้นของไอออนภายในซีโอไลท์และความเข้มข้นของโซเดียมภายนอกมีค่าแตกต่างกันมาก



ภาพที่ 16 การขยายตัวของแท่งมอร์ต้าเมื่อใช้ซีโอไลท์ในสัดส่วนต่างๆ

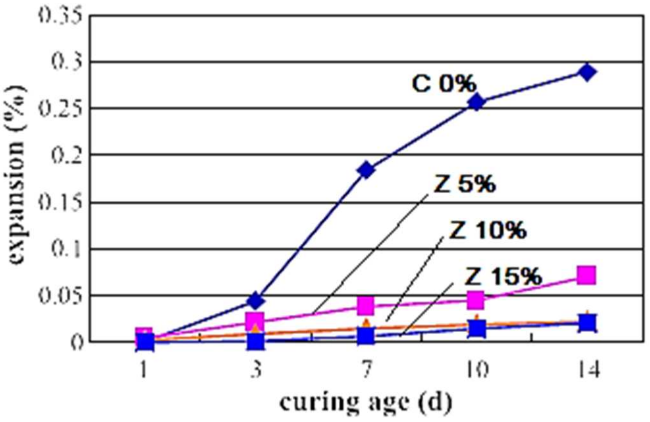
ที่มา: Ahmadi and Shekarchi (2010)



ภาพที่ 17 การเปรียบเทียบขยายตัวของแท่งมอร์ต้าที่ใช้ซีโอไลท์และเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณต่างกันที่อายุ 16 วัน

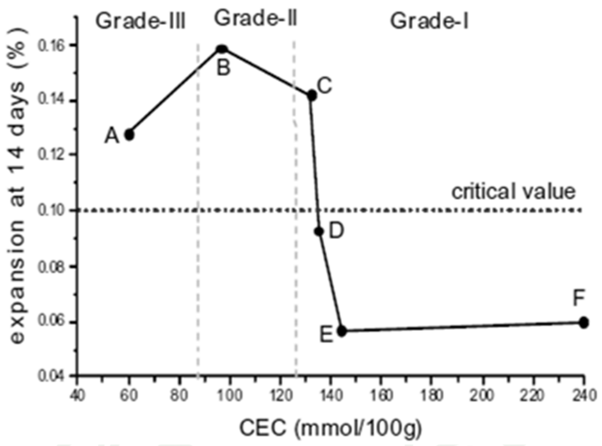
ที่มา: Ahmadi and Shekarchi (2010)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 18 การขยายตัวของแท่งมอร์ต้าตามเวลาเมื่อใช้ซีโอไลท์ปรับปรุงในสัดส่วนต่างๆ

ที่มา: Niu and Feng (2005)



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของมอร์ต้ากับค่า CEC

ที่มา: Hao (2008)

การกระตุ้นซีโอไลท์ (Activation of zeolite) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออน

จากการตรวจค้นเอกสารพบว่าซีโอไลท์ธรรมชาติมีความแปรปรวนมากซึ่งเป็นผลกระทบจากแหล่ง องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ จึงมีงานวิจัยที่พยายามศึกษาการเพิ่ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประสิทธิภาพของวัสดุ และวิธีหนึ่งที่มีการศึกษากันคือการปรับปรุงประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลท์ (CEC) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบจากค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยวิธีทดสอบค่า CEC ตามมาตรฐาน วัดจากปริมาณ Ca_2CO_3 แห้งจำนวน x มิลลิกรัมที่ใช้ทำปฏิกิริยาพอดีกับซีโอไลท์ 1 กรัม โดยทั่วไปหากซีโอไลท์มีค่า CEC มากก็จะมีประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนสูง (Hao, 2008)

การกระตุ้นซีโอไลท์นั้นอาศัยการแทนที่ไอออนของประจุบวกด้วยประจุบวกอื่นเพื่อใช้แลกเปลี่ยนกับไอออนขณะทำปฏิกิริยาหลัก สามารถทำได้ 2 วิธี คือ ใช้ไอออนขนาดเล็กแลกเปลี่ยน ammonium ion exchange (สมการที่ 3) และการใช้ไอออนขนาดใหญ่แลกเปลี่ยน polyvalent ion exchange (สมการที่ 4)

Ammonium ion exchange

$$M^+.Zeolite_{(s)} + NH_4^+{}_{(aq)} \leftrightarrow NH_4^+.Zeolite_{(s)} + M^+{}_{(aq)}$$

(3)

$$NH_4^+.Zeolite_{(s)} \rightarrow NH_{3\,(g)} + H^+.Zeolite_{(s)}$$

Polyvalent ion exchange

$$M^+.Zeolite_{(s)} + M(H_2O)^{n+}{}_{(aq)} \leftrightarrow M.(H_2O)^n.Zeolite_{(s)} + nM^+{}_{(aq)}$$

(4)

$$M.(H_2O)^n.Zeolite_{(s)} \rightarrow MOH^{(n-1)}{}_{(s)} + H^+.Zeolite_{(s)}$$

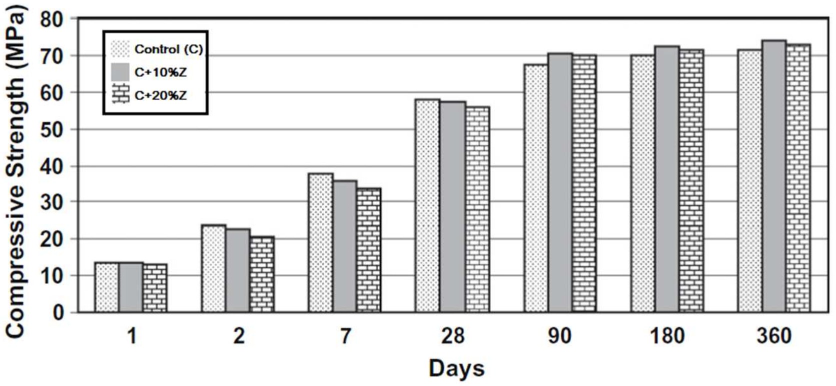
ซึ่งผลลัพธ์สุดท้ายของทั้ง 2 วิธีจะได้ผลลัพธ์เป็น H^+ Zeolite ซึ่งเป็นซีโอไลท์ที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ง่ายที่สุดสำหรับการแลกเปลี่ยนประจุแอลคาไล ในการทำปฏิกิริยาเพื่อป้องกันปฏิกิริยา ASR ดังสมการที่ 5 (Szostak, 1998)

$$H^+.Zeolite_{(s)} + Na^+{}_{(aq)} \rightarrow Na^+.Zeolite + H_2O_{(l)} \qquad (5)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลของซีโอไลท์ธรรมชาติต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

การใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติแทนที่ปูนซีเมนต์ ทำให้คอนกรีตทึบน้ำมากขึ้น ความสามารถในการดูดซึมน้ำของคอนกรีตลดลง (Ahmadi and Shekarchi, 2010) และจากการทดสอบของ Ikotun และ Ekolu (2010) ที่ใช้ซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ระหว่าง 10-20% ปรากฎว่าการเติมซีโอไลท์จะทำให้กำลังรับแรงดึงจะลดลงในช่วงต้นและจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงหลังจาก 28 วัน ส่วนด้านการพัฒนากำลังรับแรงอัดเมื่อใช้แทนที่ซีโอไลท์เพิ่มขึ้นจะทำให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดช้าลงในช่วงต้นเล็กน้อยและจะเพิ่มขึ้นในช่วงหลัง (Perraki *et. al.,* 2010) ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์เมื่อใช้ซีโอไลท์ในสัดส่วนต่างๆ

ที่มา: Perraki *et*. al. (2010)

การใช้ซีโอไลท์ในการศึกษาส่วนใหญ่เป็นการใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติ และใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปริมาณระหว่าง 0 ถึง 40 เปอร์เซนต์ สามารถลดการขยายตัวจาก ASR ได้ การปรับปรุงซีโอไลท์ธรรมชาติก่อน ทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้นสามารถลดปริมาณการใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติลงได้ ซึ่งก็จะเป็นผลดีต่อสมบัติทางกล ประสิทธิภาพการไหลของมอร์ต้าร์และคออนกรีตด้วย ส่วนการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์พบว่ายังไม่มีรายงานการศึกษาหรือนำไปใช้เพื่อการลดปฏิกิริยา ASR

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการศึกษา

อุปกรณ์

1. เครื่องผสม, ใบพาย, ถ้วยกวน

2. โต๊ะสั่นเขย่าคอนกรีตเข้าแบบ, เกรียง, ค้อนเคาะแบบ

3. แบบหล่อแท่งมอร์ต้า ขนาด 2.5 x 7.5 x 25 เซนติเมตร

4. แบบหล่อคอนกรีตลูกบาศก์ ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร

5. แบบหล่อคอนกรีตปริซึม ขนาด 7.5 x 7.5 x 25 เซนติเมตร

6. แบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอก ขนาด 10 x 20 เซนติเมตร

7. ชุดกรองสาร ครกบด

8. ตู้เผา 400°C, ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ 80°C และถังควบคุมอุณหภูมิ 60°C

9. เครื่องชั่งน้ำหนัก (ความละเอียด 0.1 กรัม)

10. สารเคมี NaOH (99%โดยน้ำหนัก) และ NH_4Cl (99%โดยน้ำหนัก)

11. เครื่องร่อนมวลรวม, ตระแกรงร่อนมวลรวม

12. ภาชนะบรรจุแท่งมอร์ต้า, คอนกรีตปริซึม ทนความร้อนได้ 80 องศาเซลเซียส

13. เครื่องวัดการขยายตัว (ความละเอียด 0.02 ไมโครเมตร)

14. ชุดเครื่องมือตัดคอนกรีต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

15. ชุดทดสอบการไหล (Table flow)

16. เครื่องกดคอนกรีต (กำลังสูงสุด 75 ตัน)

17. เครื่องบดมวลรวม

18. ถังบรรจุน้ำ น้ำกลั่น

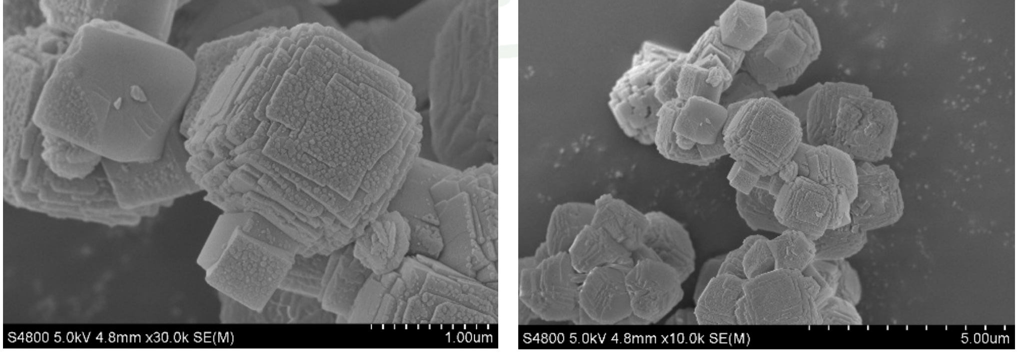
วิธีการดำเนินการศึกษา

ในการศึกษานี้มีรายละเอียดวัสดุและแนวทางการศึกษาดังแสดงแผนผัง ในภาพที่ 24

รายละเอียดวัสดุที่ใช้ทดสอบ

1. มวลรวมที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นหินไรโอไลต์ (Rhyolite) จากภาคกลาง ซึ่งเป็นหินที่มีการใช้งานจริง ในท้องถิ่นและมีผลการวิจัยว่าสามารถเกิดปฏิกิริยา ASR ได้ (สุวิมล และคณะ, 2555: ศุภชัย, 2556: วัชรากร, 2557)

2. ซีโอไลท์สังเคราะห์ (Synthetic Zeolite; SZ) เป็นวัสดุเชิงพาณิชย์ ชนิด ซีโอไลท์ เอ (Zeolite A) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท พีคิว เคมิคอลส์ (ประเทศไทย) มีสูตรทางเคมีคือ $Na_2O.Al_2O_3.2SiO_2.4.5H_2O$ ขนาดเฉลี่ย 4.24 ไมโครเมตร ใช้เป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ มีลักษณะอนุภาคผงสีขาว ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ภาพขยายซีโอไลท์สังเคราะห์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

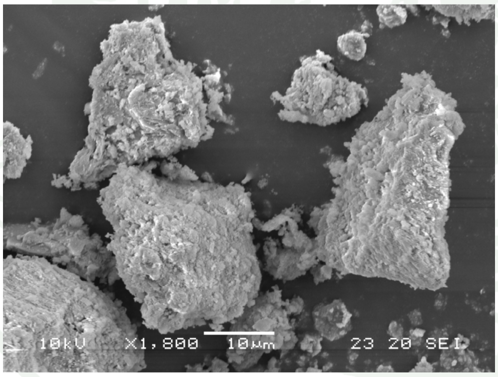
3. ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง (Modified Synthetic Zeolite; MZ) เป็นซีโอไลท์ เอ ที่ได้รับการกระตุ้น โดยในการศึกษานี้ใช้วิธีแช่ซีโอไลท์ เอ ในสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 2 โมลาร์ คนให้สารละลายเข้ากัน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมากรองและล้างด้วยน้ำ จากนั้นอบจนแห้ง แล้วเผาด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง เพื่อให้ซีโอไลท์อยู่ในสภาพพร้อมแลกเปลี่ยนประจุ ซึ่งเป็นกระบวนการที่อ้างอิงมาจากรายงานวิจัยของ Niu และ Feng ดังสมการที่ 6 (Niu and Feng, 2005)

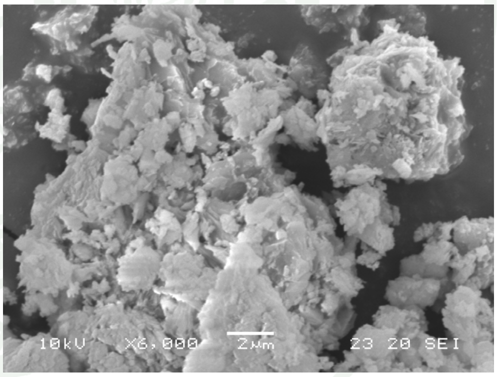
$$Na.Zeolite_{(s)} + NH_4Cl_{(aq)} \leftrightarrow NH_4^+.Zeolite_{(s)} + NaCl_{(aq)}$$

(6)

$$NH_4^+.Zeolite_{(s)} \xrightarrow{Calcine\ 400℃} NH_{3\ (g)} + H^+.Zeolite_{(s)}$$

4. ซีโอไลท์ธรรมชาติ (Natural Zeolite; NZ) เป็นซีโอไลท์ธรรมชาติประเภท Clinoptilite ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้า สูตรทางเคมีคือ $Na_4K_4Al_8Si_{40}O_{96}.24H_2O$ นำมาบดละเอียดจนมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 20 ไมโครเมตร ใช้เป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ มีลักษณะเมื่อขยาย ในภาพที่ 22

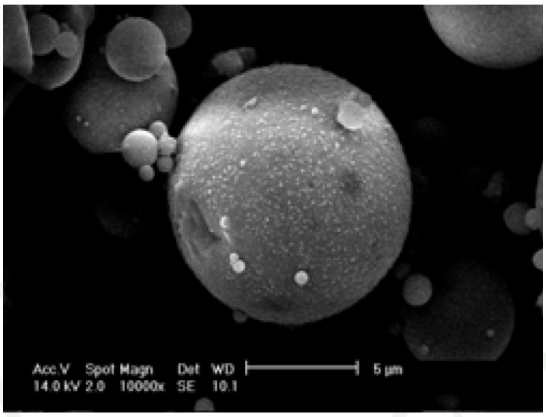




ภาพที่ 22 ภาพขยายซีโอไลท์ธรรมชาติ

5. เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นเถ้าลอยจาก อำเภอ แม่เมาะ จังหวัด ลำปาง ขนาดเฉลี่ย 1.84 ไมโครเมตร มีลักษณะกลม ดังภาพที่ 23 ใช้เป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ ซึ่งมีรายงานว่าสามารถใช้ลดปฏิกิริยา ASR ได้ (Sangsuwan and Sujjavanich, 2011) นำมาทดลองเพื่อเปรียบเทียบวิธีทดสอบ Modified ASTM C1260

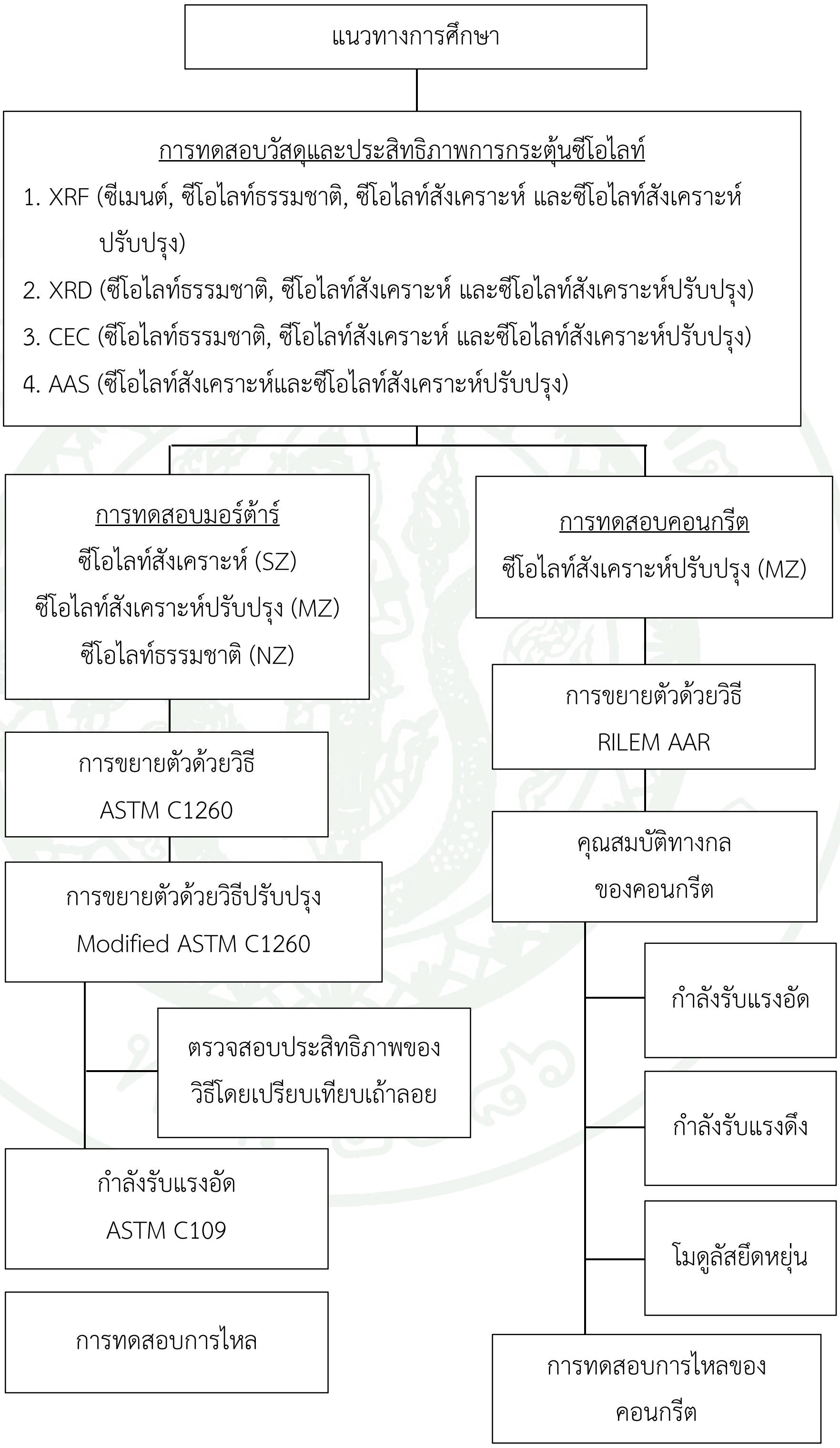
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 23 ภาพขยายเถ้าลอย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แนวทางการศึกษา



ภาพที่ 24 แผนผังแนวทางการศึกษา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดสอบวัสดุและประสิทธิภาพการกระตุ้นซีโอไลท์

1. ทดสอบวัสดุที่ใช้ในการศึกษาคือซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ได้รับและปรับปรุง และซีโอไลท์ธรรมชาติ (SZ, MZ, NZ) เพื่อวิเคราะห์หาธาตุเคมีด้วยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF); PANalytical, Model: Axios (Standardless Program: Omnian) โดยทดสอบที่สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

2. ทดสอบวัสดุที่ใช้ในการศึกษา (SZ, MZ) เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางแร่ด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ X-Ray Diffraction Analysis (XRD) ทดสอบโดยบริษัท พีคิว เคมิคอลส์ (ประเทศไทย)

3. ทดสอบวัสดุที่ศึกษา (SZ, MZ, NZ) เพื่อหาค่าการแลกเปลี่ยนไอออน Cation Exchange Capability (CEC) โดยวิธีมาตรฐานเทียบกับ $CaCO_3$ โดยทดสอบที่บริษัท พีคิว เคมิคอลส์ (ประเทศไทย)

4. การทดสอบสารละลายที่ใช้แช่ (SZ, MZ) ในระยะเวลาที่กำหนดด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ธาตุ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS**)** วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Atomic Emission Spectrometry โดยเครื่อง AAS (Flame technic) Model: GBC AVANTA โดยทดสอบที่ศูนย์เครื่องมือกลาง สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยการวัดปริมาณธาตุแอลคาไลในสารละลายก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับซีโอไลท์ (Modified zeolite) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ 25 เปอร์เซ็นโดยน้ำหนัก และคนสารละลาย 24 ชั่วโมง แล้วนำไปหาปริมาณโซเดียมในสารละลาย

2. ทำตามข้อที่ 1. โดยเปลี่ยนสารเป็นซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง และทำการเปรียบเทียบ

3. ใช้น้ำแทนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และทำซ้ำข้อที่ 1.และ2. เพื่อเป็นการยืนยันผลการศึกษาในส่วนนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดสอบพฤติกรรมการควบคุมการขยายตัวของมอร์ต้าร์ กำลังรับแรงอัด และความสามารถในการเทเบื้องต้น

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบมอร์ต้าร์โดยใช้มวลรวมที่เกิดปฏิกิริยาแอลคาไลน์ซิลิกา โดยมีการทดสอบต่างๆดังนี้

1. การทดสอบการขยายตัวด้วยวิธีแท่งมอร์ต้าร์ ASTM C1260 (Mortar bar method)

การทดสอบการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าในสภาวะเร่งปฏิกิริยา (Accelerate-Mortar-Bar Method) ASTM C1260 โดยวัดการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าที่ใช้ซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ ขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ใช้มวลรวมคัดขนาดตามตารางที่ 3 จำนวน 990 กรัม

2. ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 จำนวน 440 กรัม และใช้อัตราส่วน w/c 0.47 ในการผสม

3. หล่อมอร์ต้า ขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร ทิ้งไว้สัมผัสความชื้น 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง แล้วแกะแบบ และวัดความยาวเริ่มต้น (Initial length) ด้วย Length Comparator

4. นำมอร์ต้าแช่น้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมงแล้ววัดการขยายตัวเริ่มต้น (Zero Reading)

5. นำมอร์ต้าแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ ในภาชนะปิด ที่ควบคุมอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เมื่อครบ 1 วันนำมาวัดความยาวที่เปลี่ยนไป และวัดความยาวที่เปลี่ยนต่อไปจนครบ 28 วัน

6. ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในสัดส่วน 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0, 7.5 และ 10 เปอร์เซนต์ และทำซ้ำตามข้อ 1. ถึง 5.

7. ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในสัดส่วน 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.5 เปอร์เซนต์ และทำซ้ำตามข้อ 1. ถึง 5.

8. ใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในสัดส่วน 10 และ 20 เปอร์เซนต์ และทำซ้ำตามข้อ 1. ถึง 5.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 3 ขนาดคละของมวลรวมสำหรับแท่งมอร์ต้าร์

ขนาดตะแกรง		%
ผ่าน	ค้าง	
4.75mm (No.4)	2.36 mm (No.8)	10
2.36 mm (No.8)	1.18 mm (No.16)	25
1.18 mm (No.16)	600 μm (No.30)	25
600 μm (No.30)	300 μm (No.50)	25
300 μm (No.50)	150 μm (No.100)	15

ที่มา: ASTM C1260

2. การทดสอบการขยายตัวโดยการปรับปรุงวิธีทดสอบแท่งมอร์ต้าร์ (Modified mortar bar method)

การทดสอบการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าในสภาวะเร่งปฏิกิริยา (Accelerate-Mortar-Bar Method) แบบประยุกต์จากมาตรฐาน (Modified ASTM C1260) เนื่องจากต้องการทดสอบสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลท์ซึ่งไม่สามารถใช้วิธีมาตรฐาน ASTM C1260 (ซึ่งใช้การแช่ตัวอย่างในสภาวะแวดล้อม 1N NaOH) พิสูจน์ได้ โดยปรับเป็นการแช่ตัวอย่างในไอน้ำอุณหภูมิสูงแทนและวัดการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าที่ใช้ซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ ขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ใช้มวลรวมคัดขนาดตามตารางที่ 3 จำนวน 990 กรัม
2. ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 จำนวน 440 กรัม และใช้อัตราส่วน w/c 0.47 ในการผสม
3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มีอัตราส่วนแอลคาไลเป็นร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์
4. หล่อมอร์ต้า ขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร ทิ้งไว้สัมผัสความชื้น 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง แล้วแกะแบบ และวัดความยาวเริ่มต้น (Initial length) ด้วย Length Comparator
5. บ่มไอน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ภายในภาชนะ ครบ 1 วันนำมาวัดความยาวที่เปลี่ยนไป และวัดความยาวที่เปลี่ยนต่อไปจนครบ 28 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในสัดส่วน 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.5 เปอร์เซนต์ และทำซ้ำตามข้อ 1. ถึง 5.

7. ใช้เถ้าลอยจากแหล่งเดิมที่มีการศึกษาแล้ว (Sangsuwan and Sujjavanich, 2011) แทนที่ปูนซีเมนต์ 35 และ 50% เพื่อเตรียมตัวอย่างแท่งมอร์ต้าร์ และทดสอบซ้ำตามข้อ 1.-5. เพื่อเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์เดียวกัน

3. การทดสอบการรับแรงอัดของมอร์ต้าร์รูปลูกบาศก์ (Compressive strength mortar cube method)

เป็นการทดลองปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซีโอไลท์ ใช้การทดสอบกำลังรับแรงอัดของลูกบาศก์มอร์ต้า และแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 0, 2.5, 10, 20 เปอร์เซนต์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1.ใช้ส่วนผสมตามข้อแนะนำตาม ASTM C109 ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.485

2.หล่อมอร์ต้า ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร บ่มความชื้น 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องแล้ว แกะแบบ

3.แช่น้ำจนครบอายุ 7 และ 28 วัน แล้วนำมาทดสอบแรงอัด

4.ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในสัดส่วน 2.5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ และทำซ้ำตามข้อ 1. ถึง 4.

5.ใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในสัดส่วน 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ และทำซ้ำตามข้อ 1. ถึง 4.

ตารางที่ 4 ปริมาณวัสดุสำหรับก้อนตัวอย่างมอร์ต้าร์ซีเมนต์มอร์ต้าร์รูปลูกบาศก์

ส่วนผสม	จำนวนชิ้นตัวอย่าง	
	6	9
ปูนซีเมนต์ (กรัม)	500	740
ทราย (กรัม)	1375	2035
น้ำ (มิลลิลิตร)	242	359

ที่มา: ASTM C109

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. การทดสอบการไหลของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์

เพื่อป็นแนวทางในการพิจารณาผลกระทบของซีโอไลท์ที่มีต่อปูนซีเมนต์ การศึกษาส่วนนี้จึงใช้การทดสอบการไหลของซีเมนต์เพสต์ (Mini slump) (Kantro, 1980) และใช้การทดสอบค่าการยุบตัวของมอร์ต้าร์โดยใช้โต๊ะการไหล (Flow table) (ASTM C230) โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การทดสอบการไหลของซีเมนต์เพสต์ (Mini slump) (Kantro, 1980)

1. ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 จำนวน 80 กรัม ใช้อัตราส่วน w/c 0.48
2. ผสมซีเมนต์เพสต์ให้เข้ากัน เทซีเมนต์เพสต์ใส่กรวยที่วางบนกระจกเรียบ
3. ยกกรวยขึ้นตรงๆ และวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของซีเมนต์เพสต์เมื่อเวลาผ่านไป 30 วินาที
4. ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในสัดส่วน 0.5, 1.0, 1.5 เปอร์เซนต์ และทำซ้ำตามข้อ 1. ถึง 3.

4.2 การทดสอบค่าการยุบตัวของมอร์ต้าร์โดยใช้โต๊ะการไหล (Flow table) (ASTM C230)

1. ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 จำนวน 250 กรัม ใช้อัตราส่วน w/c 0.54 ผสมกับทรายจำนวน 687.5 กรัม
2. ผสมมอร์ต้าร์ให้เข้ากัน เทมอร์ต้าร์ใส่แบบหล่อบนโต๊ะการไหล
3. ยกแบบขึ้นในแนวดิ่ง และปรับโต๊ะการไหลขึ้นลงในแนวดิ่งด้วยความเร็วสม่ำเสมอ จำนวน 50 ครั้ง วัดระยะที่มอร์ต้าร์แผ่กระจายออก
4. ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในสัดส่วน 0.5, 1.0, 1.5 เปอร์เซนต์ และทำซ้ำตามข้อ 1. ถึง 3.

การทดสอบพฤติกรรมการควบคุมการขยายตัวของคอนกรีตในระยะเวลายาว สมบัติทางกล และความสามารถในการเท

ในการศึกษาส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของคอนกรีต ซึ่งใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากกว่ามอร์ต้าร์ โดยมีกิจกรรมดังแสดงในตารางที่ 5 และแนวทางการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 25

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 5 การทดสอบการขยายตัวและสมบัติทางกลของคอนกรีตลักษณะ ณ อายุต่างๆ

การทดสอบ	**ชุดควบคุม**	**ชุดแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะปรับปรุง 1.0%**	**1.5%**	**2.5%**
การขยายตัว *วัดทุกๆ 5 สัปดาห์ (ในอุณหภูมิ 60˚)*	O	O	O	O
สมบัติทางกล *เมื่อคอนกรีตอายุ 28 วัน (ในน้ำ)*	O	-	-	-
สมบัติทางกล *เมื่อคอนกรีตอายุ 10 สัปดาห์ (ในอุณหภูมิ 60˚)*	O	O	O	O
สมบัติทางกล *เมื่อคอนกรีตอายุ 20 สัปดาห์ (ในอุณหภูมิ 60˚)*	O	O	O	O

1. การทดสอบการขยายตัวของคอนกรีต

ในการศึกษานี้เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องเวลา ประกอบกับเป็นการศึกษาแบบเปรียบเทียบ จึงเลือกใช้ การทดสอบการขยายตัวของคอนกรีตปริซึมขนาด 75x75x285 มิลลิเมตร (Accelerate-Concrete-Prisms Method) RILEM AAR4 ซึ่งมีระยะเวลาการวัด 20 สัปดาห์ ภายในการบ่มที่ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสภาวะเร่งมากกว่าการทดสอบตาม ASTM C1293 ซึ่งต้องใช้ระยะเวลานานกว่ามาก (52 สัปดาห์) การทดสอบนี้วัดการขยายตัวของคอนกรีตปริซึมที่เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสภาวะเร่งปฏิกิริยาด้วยอุณหภูมิ โดยมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังนี้

1. ใช้ขนาดมวลรวมหยาบ (4 ถึง 22.5มิลลิเมตร) และมวลรวมละเอียด (0 ถึง 4มิลลิเมตร) 60 และ 40 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ (ตามข้อแนะนำในตารางที่ 6)

2. ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 และส่วนผสมตามตารางที่ 7 และใช้อัตราส่วน w/c 0.50 ในการผสม

3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มีอัตราส่วนแอลคาไลเป็นร้อยละ 1.25 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ (RILEM AAR4) โดยให้ขั้นตอนการผสมเป็นไปตามตารางที่ 8

4. หล่อคอนกรีตปริซึม ขนาด 75x75x285 มิลลิเมตร โดยฝังหมุดไว้ที่ปลายทั้งสองด้าน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องแล้วถอดแบบหล่อและวัดความยาวและน้ำหนักเริ่มต้น

6. นำคอนกรีตปริซึมบ่มไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนมีอายุ 5 สัปดาห์ หลังจากหล่อคอนกรีตปริซึม แล้ววัดความยาวและน้ำหนัก

7. วัดความยาวและน้ำหนักคอนกรีตปริซึมที่อายุ 10, 15 และ 20 สัปดาห์ หลังจากหล่อคอนกรีตปริซึม

8. ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ปูนซีเมนต์ 1.0, 1.5 และ 2.5 เปอร์เซนต์และทำซ้ำตามข้อ 1. ถึง 7.

ตารางที่ 6 ขนาดคละของมวลรวมที่แนะนำสำหรับคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ

ขนาดช่องว่าง (มม.)	ร้อยละโดยมวลที่ผ่านตะแกรง
22.4	100
16.0	75 - 95
8.0	45 - 70
4.0	35 - 55
2.0	25 - 45
1.0	20 - 35
0.5	10 - 25
0.25	4 - 12
0.125	1 - 8

ที่มา Rilem TC 191-ARP

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 7 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

ปริมาณปูนซีเมนต์	440 kg/m^3
ปริมาณน้ำ	220 kg/m^3
ปริมาณมวลรวมหยาบ (ขนาด 4 - 22.4 มม.)	60% by mass
ปริมาณมวลรวมละเอียด (ขนาด 0 - 4 มม.)	40% by mass
ปริมาณอากาศ	<3%

ที่มา: Rilem TC 191-ARP

ตารางที่ 8 ขั้นตอนการผสมคอนกรีตที่แนะนำ

ลำดับการใส่วัสดุ	เวลาที่ต้องเติมวัสดุ (วินาที)	เวลาที่ใส่ผสม (วินาที)
มวลรวมละเอียดและหยาบ	0	60
น้ำครึ่งหนึ่ง + NaOH	60	120
หยุดชั่วคราว	120	180
ปูนซีเมนต์ + น้ำครึ่งหนึ่ง	180	300

ที่มา: Rilem TC 191-ARP

2. การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

ใช้การเตรียมส่วนผสมคอนกรีตตามที่ใช้ในการทดสอบการขยายตัวของคอนกรีตปริซึม ตาม RILEM AAR4 ข้างต้น โดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จนมีระดับแอลคาไลเป็นร้อยละ 1.25 โดยน้ำหนัก หล่อคอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตรและบ่มในสภาวะเร่งปฏิกิริยาโดยมีขั้นตอนดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. ใช้ขนาดมวลรวมเช่นเดียวกับการทดสอบการขยายตัว

2. ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มีแอลคาไลน์เป็นร้อยละ 1.25 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ โดยใช้ขั้นตอนการผสมเป็นไปตามตารางที่ 8

3. หล่อคอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร เมื่อครบ24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องแล้วแกะแบบ

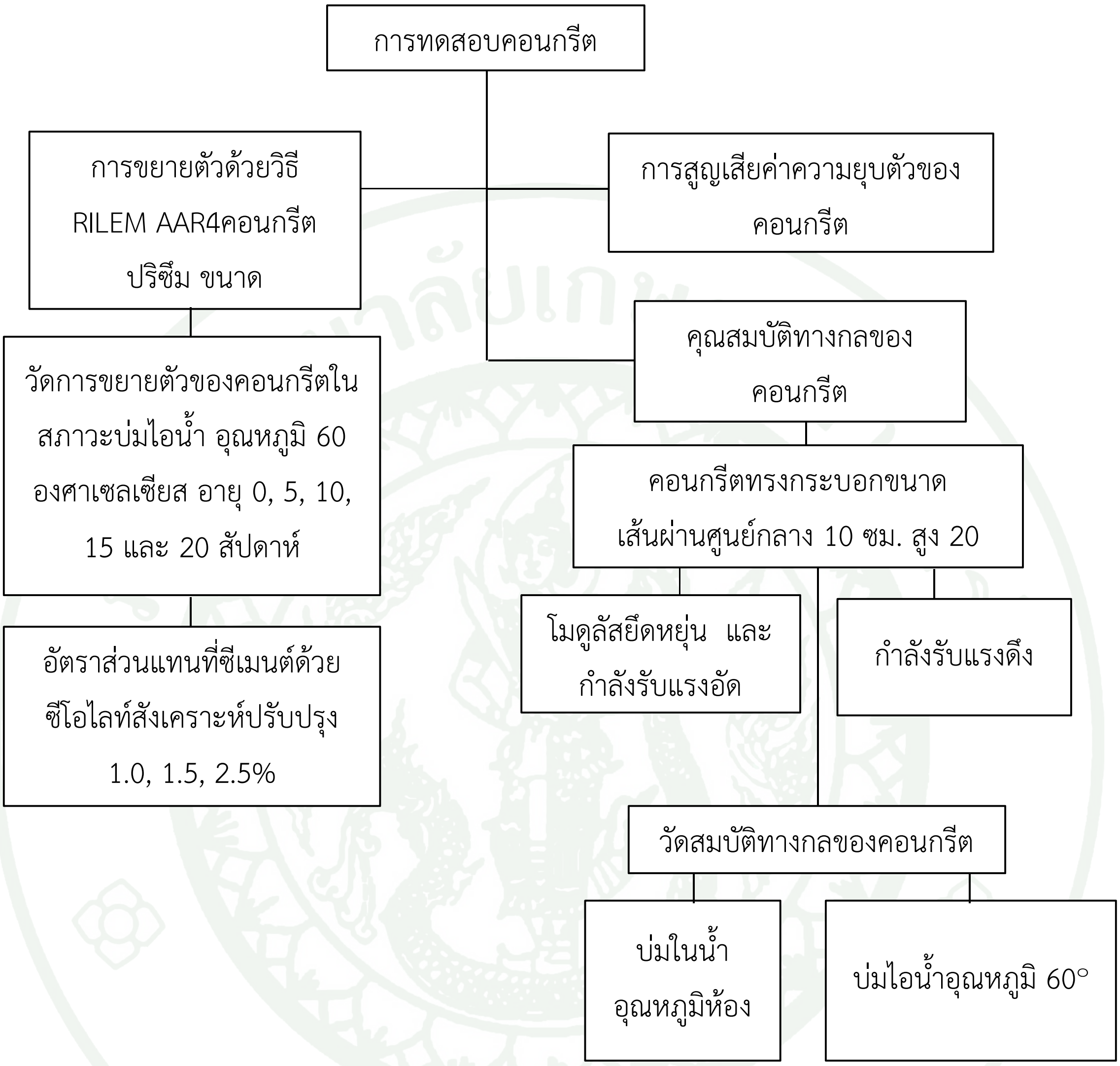
4. นำคอนกรีตทรงกระบอกบ่มไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ภายในภาชนะ แล้วนำไปทดสอบที่อายุ 10 และ 20 สัปดาห์ เปรียบเทียบกับ บ่มในน้ำ 28 วัน โดยทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 ทดสอบกำลังรับแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM C496 และทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นตามมาตรฐาน ASTM C469

5. ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ปูนซีเมนต์ 1.0, 1.5 และ 2.5 เปอร์เซนต์และทำซ้ำตามข้อ 1. ถึง 4.

3. การทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump loss)

ใช้คอนกรีตสดตามการทดสอบการขยายตัวของคอนกรีตปริซึม ทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัว แนวทางการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตมีรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 25

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 25 แนวทางการทดสอบคอนกรีต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการทดสอบและการวิจารณ์

ผลการทดสอบของงานวิจัยนี้แบ่งได้เป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาวัสดุและทดสอบและประสิทธิภาพการกระตุ้นซีโอไลท์ ตลอดจนการทดลองขั้นต้น เนื่องจากซีโอไลท์สังเคราะห์เป็นวัสดุใหม่ในงานคอนกรีตและยังไม่มีข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการประยุกต์ในการใช้งานทางวิศวกรรมโยธา ส่วนที่สองเป็นผลการศึกษาพฤติกรรมการควบคุมการขยายตัวของมอร์ต้าร์ กำลังรับแรงอัด และความสามารถในการเทเบื้องต้น โดยใช้การทดสอบ 4 ชุด คือ การขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ การขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ด้วยวิธีปรับปรุง การทดสอบกำลังรับแรงอัดของลูกบาศก์มอร์ต้าร์ และการทดสอบการไหลของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์ ส่วนที่สามเป็นผลการทดสอบพฤติกรรมการควบคุมการขยายตัวของคอนกรีตในระยะเวลายาว สมบัติทางกล และความสามารถในการเทโดยใช้การทดสอบ 3 ชุด คือการขยายตัวของคอนกรีตปริซึม สมบัติทางกลของคอนกรีตรวมทั้งการทดสอบการไหล

การศึกษาวัสดุและประสิทธิภาพการกระตุ้นซีโอไลท์

ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับซีโอไลท์สังเคราะห์ตามวิธีที่อธิบายในรายละเอียดวัสดุที่ใช้ทดสอบ รวมถึงการเปรียบเทียบกับคุณสมบัติบางประการกับซีโอไลท์ธรรมชาติ ด้วยเทคนิคดังต่อไปนี้

1. การทดสอบวัสดุด้วยเทคนิค XRF

จากผลการวิเคราะห์ XRF ของซีโอไลท์ พบว่าปริมาณค่าโซเดียมออกไซด์ในซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงหลังจากผ่านกระบวนการกระตุ้นลดลง 63 เปอร์เซนต์ เมื่อเทียบกับก่อนกระบวนการกระตุ้นซีโอไลท์ (19.88% และ 31.29%) แสดงให้เห็นว่าประจุบวกในซีโอไลท์สามารถแลกเปลี่ยนกับประจุบวกภายนอกได้ เมื่อพิจารณาถึงปฏิกิริยา ASR ที่ปัจจัยหนึ่งคือปริมาณแอลคาไล ดังนั้นสมมุติฐานหนึ่งของการศึกษานี้คือ การที่ซีโอไลท์มีโซเดียมออกไซด์ลดลงหากใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์จะช่วยดึงดูดโซเดียมออกไซด์จากภายนอกให้อยู่ในโครงสร้างซีโอไลท์ได้ และทำให้ปฏิกิริยา ASR เกิดได้ช้าลง อย่างไรก็ดีปริมาณแอลคาไลที่มีอยู่ในซีโอไลท์ทั้งสองชนิด ก็ยังมีอยู่ในระดับสูงเมื่อเปรียบเทียบกับซีโอไลท์ธรรมชาติ ดังแสดงในตารางที่ 9 ซึ่งพบว่ามีปริมาณโซเดียมออกไซด์ต่ำและค่า Na_2O_{eq} ของวัสดุทั้ง 3 ชนิดมีค่าสูงกว่า 0.6 % ทั้งสิ้น โดยซีโอไลท์ธรรมชาติมีอซิลิกอนออกไซด์เป็นออกไซด์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 9 ส่วนประกอบทางเคมีของซีโอไลท์แต่ละประเภท

ออกไซด์%	ซีโอไลท์สังเคราะห์	ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง	ซีโอไลท์ธรรมชาติ
Na_2O	31.29	19.88	0.63
Al_2O_3	30.39	33.89	13.01
SiO_2	38.13	43.45	78.51
Cl	0.02	2.68	0.02
K_2O	0.03	0.01	1.39
CaO	0.02	0.03	3.39
TiO_2	0.01	0.01	0.18
Fe_2O_3	0.02	0.02	1.29
Na_2O_{eq}	31.31	19.89	1.54

วิธีกระตุ้นซีโอไลท์โดยการใช้สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ ใช้หลักการแลกเปลี่ยนประจุของซีโอไลท์ สามารถลดปริมาณโซเดียมได้ในระดับหนึ่ง แต่จากการศึกษาพบว่ามีอีกหลายวิธีที่สามารถทำให้ซีโอไลท์แลกเปลี่ยนประจุได้เช่น การใช้กรดแลกเปลี่ยนประจุเพราะกรดสามารถแต่ตัวให้โปรตอน (H^+) ได้ (Szostak, 1998) ในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้ทดสอบเพิ่มเติมโดยเลือกใช้ กรดไนตริก (AZ1) และกรดซัลฟูริก (AZ2) แทนสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (MZ) เพื่อเปรียบเทียบ ปฏิกิริยาเป็นไปตามสมการที่ 7 และ 8 และ ได้ทดสอบออกไซด์เพื่อหาส่วนประกอบหลักหลังเกิดปฏิกิริยา ผลปรากฏดังตารางที่ 11

$$\text{Na.Zeolite}_{(s)} + HNO_{3\,(aq)} \rightarrow H^+.\text{Zeolite}_{(s)} + NaNO_{3\,(aq)} \quad (7)$$

$$\text{Na.Zeolite}_{(s)} + H_2SO_{4\,(aq)} \rightarrow H^+.\text{Zeolite}_{(s)} + Na_2SO_{4\,(aq)} \quad (8)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบส่วนประกอบหลักของซีโอไลท์สังเคราะห์ก่อนและหลังกระตุ้นด้วยวิธีต่างๆ

Element	SZ	MZ (NH_4Cl)	AZ1 (HNO_3)	AZ2 (H_2SO_4)
Na	23.22	14.75	27.20	19.90
Si	17.82	20.31	14.37	21.12
Al	16.09	17.94	20.87	16.37

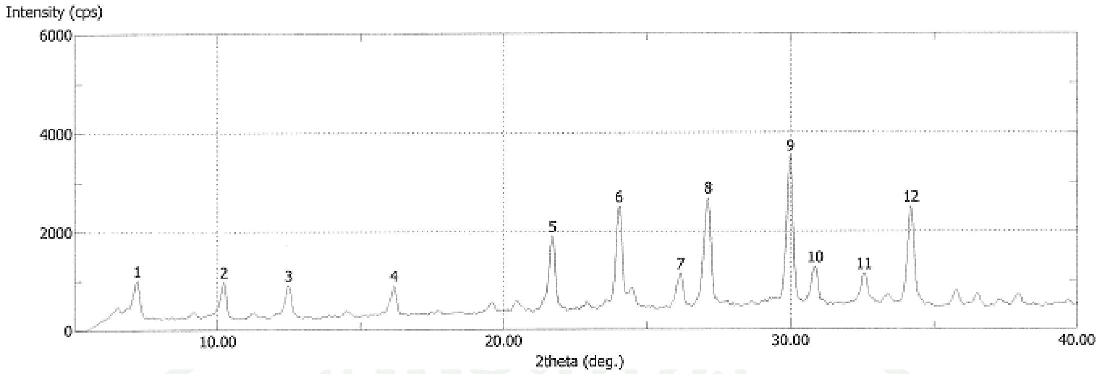
SZ= ซีโอไลท์สังเคราะห์, MZ= ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงด้วย NH_4Cl, AZ1= ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงด้วย HNO_3, AZ2= ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงด้วย H_2SO_4

หลังจากการกระตุ้นซีโอไลท์ด้วยกรดซัลฟูริกและกรดไนตริก ปรากฏว่าทั้ง AZ1 และ AZ2 จำนวนโซเดียมมีปริมาณสูงกว่ากระตุ้นซีโอไลท์ด้วยแอมโมเนียมคลอไรด์ โดยที่ AZ1 มีปริมาณซิลิกอนลดลงส่วน AZ2 มีจำนวนใกล้เคียง MZ ซึ่งปรากฏว่าหลังผสมกรดกับซีโอไลท์สังเคราะห์พบการเกิดเป็นเจล จึงมีความเป็นไปได้ว่าเกิดจากกรดชะอะลูมิเนียมออกจากโครงสร้างซีโอไลท์ โดยกรดซัลฟูริกและกรดไนตริก ทำปฏิกิริยากับอลูมิเนียมเกิดเป็นอลูมิเนียมเจล (Yan et.al., 2003; Numluk and Chaisena, 2012; Ajemba and Onukwli, 2012) ด้วย ในการศึกษานี้เลือกใช้การปรับปรุงซีโอไลท์สังเคราะห์โดยการกระตุ้นด้วย NH_4Cl เป็นหลักเนื่องจากสามารถลดปริมาณโซเดียมไอออนได้

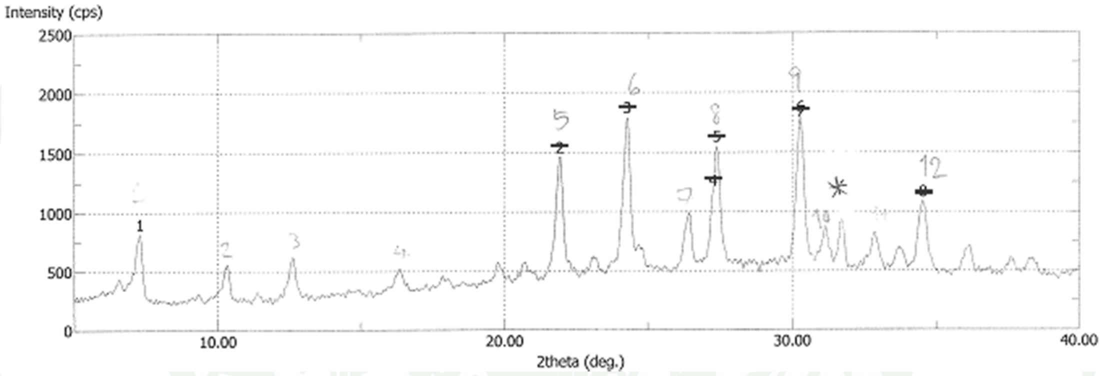
2. การทดสอบวัสดุด้วยเทคนิค XRD

จากผลการทดสอบ XRD ปรากฏดังภาพที่ 26 ซึ่งยืนยันว่าซีโอไลท์สังเคราะห์เป็นซีโอไลท์ เอ และ มีรูปแบบของจุดยอดชัดเจนครบทั้ง 12 จุดยอด รายงานของ บ.พีคิว ซึ่งให้ความอนุเคราะห์ทดสอบปรียบเทียบระบุว่า ค่าความเป็นผลึกวัดได้ที่ 98 เปอร์เซนต์เมื่อเทียบกับซีโอไลท์ เอ ส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงดังภาพที่ 27 ค่าความเป็นผลึกเทียบกับซีโอไลท์ เอ มีขนาดลดลงเหลือ 79 เปอร์เซนต์ รูปแบบของจุดยอดยังคงมีทุกจุดยอด แต่เส้นพื้น (base line) ไม่เรียบ และมีจุดยอดเพิ่มขึ้นระหว่างจุดที่ 10 ถึง 12 ซึ่งแสดงถึงสิ่งเจือปนอื่นผสม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 26 ผลการทดสอบ XRD ของซีโอไลท์สังเคราะห์ก่อนผ่านกระบวนการกระตุ้น



ภาพที่ 27 ผลการทดสอบ XRD ของซีโอไลท์สังเคราะห์หลังผ่านกระบวนการกระตุ้น

จากภาพที่ 26 และ 27 แสดงให้เห็นว่าการทดสอบกระตุ้นซีโอไลท์ด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของซีโอไลท์ หากพิจารณาจาก Intensity ที่ลดลง ณ ค่า 2θ ต่างๆซึ่งเห็นได้ว่าซีโอไลท์สังเคราะห์ (ซีโอไลท์ เอ) ที่ได้รับการกระตุ้นมีขนาดผลึกเล็กลงเมื่อเทียบกับซีโอไลท์ก่อนปรับปรุง

3. การทดสอบค่าการแลกเปลี่ยนไอออน (CEC)

จากการทดสอบค่า CEC ดังตารางที่ 11 ปรากฏว่าค่า CEC ของซีโอไลท์สังเคราะห์และซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง มีค่าเท่ากับ 281 และ98 ตามลำดับ ส่วนซีโอไลท์ธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 11

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบซีโอไลท์จากบริษัท พีคิว เคมิคอลส์ (ประเทศไทย)

ซีโอไลท์	**ค่าการแลกเปลี่ยนไอออน (CEC) (มิลลิกรัม $CaCO_3$ ต่อน้ำหนักแห้ง)**	**ค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังจากการเผา (LOI) (%)**	**ค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังการอบแห้ง (LOD) (%)**
ซีโอไลท์สังเคราะห์	281	20.0	5.5
ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง	98	20.3	3.1
ซีโอไลท์ธรรมชาติ	11	13.7	4.3

ซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงมีค่าการแลกเปลี่ยนไอออน (CEC) ต่ำกว่าซีโฮไลท์สังเคราะห์ก่อนผ่านกระบวนการกระตุ้น ค่า CEC ของซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ลดลงบ่งบอกถึงความสามารถดึงดูดไอออนที่ลดลง อย่างไรก็ตามไอออนที่ลดลงนี้เปรียบเทียบกับ Ca^{2+} ตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ไม่ได้เทียบกับปริมาณ Na^{+} ตามสมมุติฐานการแลกเปลี่ยน Na^{+} ในปฏิกิริยา ASR การลดลงของความสามารถแลกเปลี่ยน Ca^{2+} นี้อาจส่งผลทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยน Na^{+} เพิ่มขึ้นได้ อย่างไรก็fuการทดสอบนี้ยังอาจไม่สามารถสรุปพฤติกรรมการแลกเปลี่ยนไอออนกับแอลคาไลอย่างแท้จริงที่จะเกิดในคอนกรีตได้เนื่องจากวิธีทดสอบ CEC ตามมาตรฐานไม่ได้เทียบกับ Na^{+} ส่วนซีโอไลท์ธรรมชาติ หากพิจารณาค่าการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นหลัก จะเห็นว่ามีค่า CEC ที่ต่ำกว่าซีโอไลท์สังเคราะห์ทั้งแบบเดิมและที่ปรับปรุงขึ้นมาก จึงไม่ได้พิจารณาถึงผลของคุณสมบัตินี้

4. การทดสอบด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ธาตุ (AAS)

จากผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 12 บ่งชี้ว่าซีโอไลท์หลังกระตุ้นแล้วไม่ได้ทำให้ปริมาณโซเดียมในสารละลายลดลง เมื่อหากพิจารณากับปริมาณโซเดียมตั้งต้นในสารละลายทั้งซีโอไลท์และซีโอไลท์ปรับปรุง ยังทำให้ปริมาณโซเดียมในสารละลายเพิ่มขึ้นอีกด้วย การทดสอบนี้บ่งบอกถึงความเข้มข้นของ Na^{+} ที่มีอยู่มากภายในซีโอไลท์จนสามารถชะออกมาได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบปริมาณไอออนโซเดียมในสารละลาย NaOH

ปริมาณ Na^+	ความเข้มข้น (ppm)
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	217
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์+ซีโอไลท์สังเคราะห์	2101
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์+ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง	2228

ปัจจัยหนึ่งที่อาจมีผลแฝงและควรนำมาพิจารณาร่วมด้วยคือ ความเข้มข้นในระดับสูงของปริมาณโซเดียมไอออนที่มีอยู่ในโครงสร้างซีโอไลท์สังเคราะห์ หากความเข้มข้นของโซเดียมไอออนในซีโอไลท์มีค่ามากกว่าความเข้มข้นของโซเดียมไอออนในสารละลายแล้ว โซเดียมไอออนด้านที่ความเข้มข้นมากกว่าจะแพร่ไปด้านที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า จึงทำให้ความเข้มข้นโซเดียมไอออนในสารละลายหลังแช่ซีโอไลท์เพิ่มขึ้น ฉะนั้นผลการทดสอบนี้อาจไม่สามารถใช้สรุปพฤติกรรมการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลท์สังเคราะห์ได้อย่างชัดเจนเนื่องจากปัญหาการแพร่ของโซเดียมไอออน เพื่อเป็นการยืนยันสมมุติฐานจึงได้ทดสอบเพิ่มโดยใช้น้ำแทนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อเปรียบเทียบ โดยผลที่ได้ดังตารางที่ 13 เป็นไปในลักษณะใกล้เคียงกันคือ มีปริมาณโซเดียมเพิ่มขึ้นหลังผสมน้ำกับซีโอไลท์ จึงอาจสรุปได้ว่าผลจากปริมาณโซเดียมไอออนในซีโอไลท์ที่มีปริมาณสูงอยู่ในระดับเดียวกัน จะแพร่ออกสู่สารละลายภายนอกโครงสร้างซีโอไลท์ ทำให้ปริมาณโซเดียมไอออนในสารละลายเพิ่มขึ้น (1964-2279 ppm) ผลจากการศึกษานี้จึงนำไปสู่การตัดสินใจเลือกใช้วิธีทดสอบการขยายตัวในส่วนที่ 2 โดยใช้การแช่น้ำแทนการแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบปริมาณไอออนโซเดียมในน้ำ

ปริมาณ Na^+	ความเข้มข้น (ppm)
น้ำ	0
น้ำ+ซีโอไลท์สังเคราะห์	1964
น้ำ+ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง	2279

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกระตุ้นซีโอไลท์ในส่วนแรก อาจสรุปได้ว่าซีโอไลท์สังเคราะห์มีปริมาณออกไซด์หลักเป็นโซเดียมออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และซิลิกอนออกไซด์ มีค่าความเป็น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลึกสูง และมีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่สูง หลังผ่านกระบวนการกระตุ้นซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง มีปริมาณโซเดียมออกไซด์ลดลง ขนาดผลึกลดลง และมีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตลดลง แต่มีผลกระทบต่อการเพิ่มปริมาณโซเดียมไอออนในสารละลายทั้งโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำ ส่วนซีโอไลท์ธรรมชาติมีส่วนประกอบหลักเป็นซิลิกอนออกไซด์ และอลูมิเนียมออกไซด์ และมีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำ

การทดสอบพฤติกรรมการควบคุมการขยายตัวของมอร์ต้าร์ กำลังรับแรงอัด และความสามารถในการเทเบื้องต้น

1. การทดสอบการขยายตัวด้วยวิธีแท่งมอร์ต้าร์ ASTM C1260

การทดสอบการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ทั้งใช้และไม่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ แสดงในภาพที่ 28 พบว่าแท่งตัวอย่างควบคุมที่ใช้หินไรโอไลต์ล้วนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 1 N มีการขยายตัวเฉลี่ยเท่ากับ 0.264% ที่อายุ 28 วัน ซึ่งมาตรฐาน ASTM C1260 แนะนำว่าหากค่าการขยายตัวมากกว่า 0.20% ที่อายุ 28 วัน หินดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยา ASR การใช้ซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 0.5, 1, 1.5, 2.5, 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการขยายตัวตั้งแต่ระยะเวลาบ่มตั้งแต่ 1 ถึง 14 วัน ของตัวอย่างที่ใช้ซีโอไลท์ในสัดส่วน 7.5 และ 10% จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับชุดควบคุมตั้งแต่วันที่สองในการบ่ม และมีค่าสูงกว่าคำแนะนำเมื่อเร่งปฏิกิริยา 14 วันมาก (ASTM C1260) ซึ่งมีลักษณะเดียวกับสัดส่วนอื่นๆที่มีค่าการขยายตัวอยู่ระหว่าง 0.14-0.20 % ส่วนการใช้ซีโอไลท์ในสัดส่วน 5% จะขยายตัวใกล้เคียงกับชุดควบคุม และการใช้ซีโอไลท์ในสัดส่วน 1.5, 1.0 และ 0.5% จะขยายตัวต่ำกว่าชุดควบคุมเล็กน้อย

การขยายตัวตั้งแต่วันที่ 21 เป็นต้นไปของการบ่ม การใช้ซีโอไลท์ในปริมาณน้อย (ต่ำกว่าร้อยละ 5) ทำให้ค่าการขยายตัวลดลงเล็กน้อยเมื่อเท่ากับชุดควบคุม ส่วนการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ในปริมาณมาก (ร้อยละ 7.5 และ10) จะทำให้ค่าการขยายตัวสูงกว่าชุดควบคุมอย่างชัดเจน โดยการขยายตัวที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 0.248, 0.257, 0.248, 0.247, 0.253, 0.319 และ 0.359 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

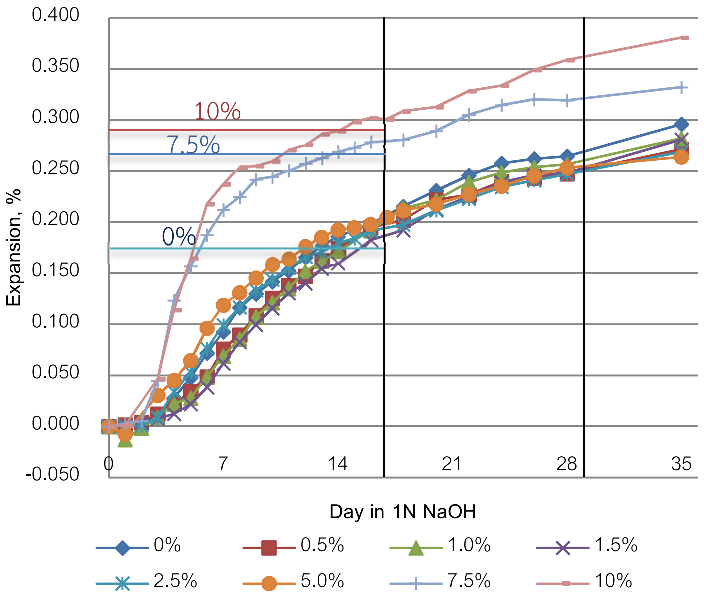
ผลการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์บ่งชี้ว่าการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์จำนวนน้อย (ต่ำกว่า 2.5%) เปรียบเทียบกับชุดควบคุม ที่อายุ 16 วันหลังหล่อตัวอย่าง มีค่าใกล้เคียงกัน และที่อายุ 28 วันหลังหล่อตัวอย่างมีค่าลดลงเล็กน้อย แสดงว่าค่า CEC (เมื่อเปรียบเทียบกับ $CaCO_3$) ที่สูงมากของซีโอไลท์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

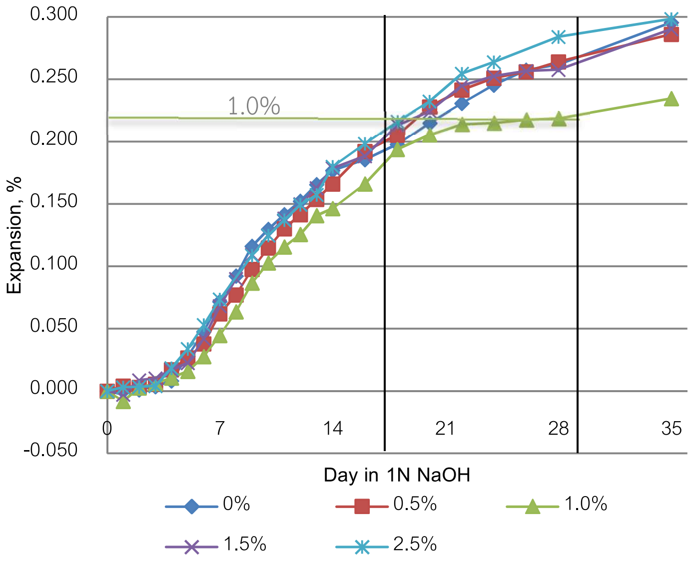
สังเคราะห์ไม่ได้ช่วยในการลดการขยายตัวมาก ผลการขยายตัวเฉลี่ยของการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ปูนซีเมนต์ 0.5, 1, 1.5 และ 2.5%มีอัตราส่วนใกล้เคียงกับชุดควบคุมทุกสัดส่วน โดยที่ตัวอย่างที่ใช้แทนที่ 1.0% มีการขยายตัวลดลงกว่าชุดควบคุมเล็กน้อย โดยตั้งแต่วันที่ 21 แท่งตัวอย่างที่ใช้แทนที่ 1.0% จะมีการขยายตัวลดลงเมื่อเทียบกับชุดควบคุมอย่างชัดเจน และเมื่ออายุบ่ม 28 วัน มีการขยายตัวสำหรับตัวอย่างที่ใช้แทนที่ 0.5, 1, 1.5 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 0.264, 0.219, 0.258 และ 0.284 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 29 แสดงว่าเมื่อปรับปรุงซีโอไลท์สังเคราะห์แล้วก็ยังไม่ได้ช่วยในการลดการขยายตัวมาก ยกเว้นการแทนที่ 1% ที่ลดการขยายตัวที่อายุ 28 วันหลังหล่อชิ้นตัวอย่าง มากกว่าสัดส่วนอื่นอย่างชัดเจน อนึ่งผลทดสอบซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงโดยการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1260 อาจไม่ใช่วิธีที่เหมาะสำหรับทดสอบพฤติกรรมการแลกเปลี่ยนไอออนต่อการขยายตัว เนื่องจากหากซีโอไลท์สามารถแลกเปลี่ยนโซเดียมไอออนภายในชิ้นตัวอย่างได้จริง โซเดียมไอออนที่มีอยู่โดยรอบชิ้นตัวอย่างแพร่เข้าสู่ชิ้นตัวอย่างเพิ่มอีกทำให้ไม่สามารถสรุปพฤติกรรมที่แท้จริงได้ ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนต้องตัดปัจจัยจากปริมาณโซเดียมไอออนจากภายนอกชิ้นงานออก ซึ่งนำปสู่การทดสอบด้วยวิธีปรับปรุงมาตรฐาน ASTM C1260 ต่อไป

เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 10 และ 20 เปอร์เซนต์ พบว่ามีค่าการขยายตัวที่อายุ 18 วันเท่ากับ 0.070 และ 0.017 เปอร์เซ็นต์ดังภาพที่ 30 การทดสอบนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของซีโอไลท์ธรรมชาติในการลดการขยายตัวได้อย่างชัดเจนทั้งสองสัดส่วน โดยการใช้ในปริมาณมากยิ่งทำให้ค่าการขยายตัวลดลง และที่ 20% ให้ผลดีมากทั้งจากการเร่งขยายตัวระยะสั้นและระยะยาว ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 0.02%

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

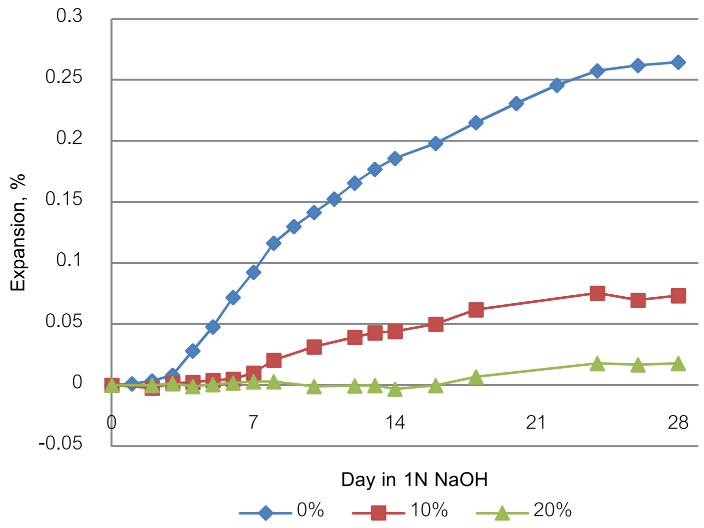


ภาพที่ 28 ค่าเฉลี่ยการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ โดยวิธี ASTM C1260



ภาพที่ 29 ค่าเฉลี่ยการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง โดยวิธี ASTM C1260

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 30 ค่าเฉลี่ยการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติแทนที่ซีเมนต์โดยวิธี ASTM C1260

2. การทดสอบการขยายตัวโดยการปรับปรุงวิธีทดสอบแท่งมอร์ต้าร์ Modified Mortar Bar (Modified ASTM C1260)

เนื่องจากซีโอไลท์ที่ใช้ในการศึกษามีปริมาณโซเดียมไอออนสูงในตัววัสดุเองทำให้การศึกษาด้วยวิธีเร่งในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ยังมีความคลุมเครือจากปริมาณโซเดียมไอออนที่มีผลกระทบอย่างแท้จริงดังผลการทดลองในหัวข้อ 1 การศึกษานี้จึงได้ขยายการทดสอบการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ด้วยวิธี Modified ASTM C1260 เพิ่มขึ้นเพื่อต้องการยืนยันการลดปฏิกิริยา ASR เนื่องจากวิธีการทดสอบการขยายตัวด้วยวิธี ASTM C1260 นั้นเป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยแช่แท่งมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเปรียบเสมือนแท่งตัวอย่างมีปริมาณไอออนโซเดียมโดยรอบชิ้นตัวอย่างเพื่อเร่งปฏิกิริยา ASR และไอออนโซเดียมที่ไม่จำกัดรอบชิ้นตัวอย่างก็สามารถแพร่เข้าสู่ชิ้นตัวอย่างได้และอาจมีผลกระทบต่อพฤติกรรมที่แท้จริงของตัวอย่างที่ใช้ ดังนั้นเพื่อพิสูจน์พฤติกรรมนี้ ในการศึกษานี้จึงได้ดัดแปลงการทดสอบการขยายตัว ASTM C1260 โดยการจำกัดปริมาณโซเดียมในชิ้นตัวอย่างโดยการเติม ปริมาณโซเดียมในน้ำที่ใช้ผสมชิ้นตัวอย่าง โดยกำหนดปริมาณ Na_2O ที่ร้อยละ 2.5 ซึ่งมีปริมาณ 2 เท่าของค่าที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน RILEM-AAR4 และบ่มชิ้นตัวอย่างในไอน้ำอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แทนการแช่ในสารละลายโซเดียมดังวิธีมาตรฐาน ทั้งยังคงใช้การผสมและวัดความยาวตามมาตรฐานปกติ ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 31 ชุดควบคุมมีการขยายตัวเฉลี่ย 0.418% ที่อายุ 16 วันหลังหล่อตัวอย่าง การใช้ซีโอไลท์ในสัดส่วน 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.5 เปอร์เซนต์ มีค่า 0.310, 0.269, 0.248 และ 0.337 เปอร์เซนต์ตามลำดับ การใช้ซีโอไลท์

สังเคราะห์ปรับปรุงสามารถลดการขยายตัวได้โดยเฉพาะที่ 2.5% เมื่อเทียบกับชุดควบคุม เนื่องจากเป็นการทดสอบที่ปรับปรุงวิธีทดสอบจากวิธีตามมาตรฐาน จึงได้ใช้เถ้าลอยที่มีผลการทดสอบว่าสามารถลดการขยายตัวได้ตามมาตรฐาน ASTM C1260 (Sangsuwan and Sujjavanich, 2011) มาทดสอบเพื่อพิจารณาเปรียบเทียบโดยใช้ปริมาณแทนที่ร้อยละ 35 และ 50% ดังแสดงในภาพที่ 32 ทั้งวัสดุมวลรวมและเถ้าลอยในการศึกษาเดียวกันกับที่ใช้อ้างอิง

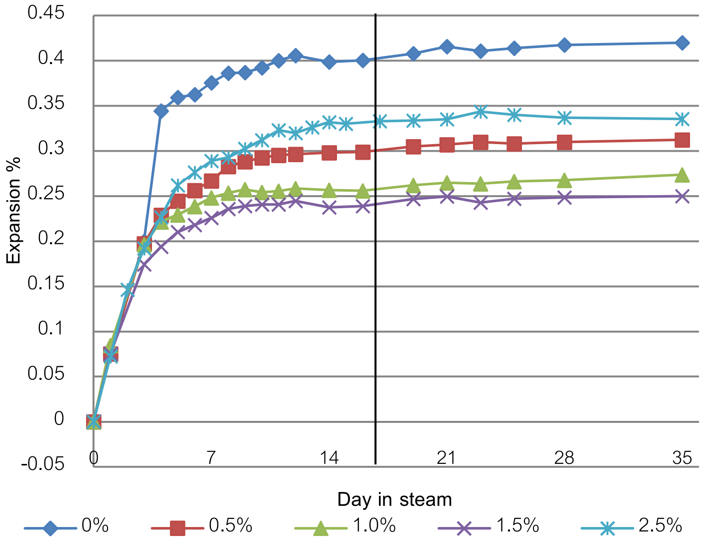
ในภาพที่ 32 การใช้เถ้าลอยสามารถทำให้การขยายตัวลดลงได้อย่างชัดเจนตั้งแต่วันที่ 4 เป็นต้นไปและจะเริ่มคงที่ตั้งแต่วันที่ 10 การขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ 35 และ 50 เปอร์เซนต์ ที่อายุบ่ม 28 วันมีค่าเท่ากับ 0.179 และ 0.127 เปอร์เซนต์ตามลำดับ โดยข้อมูลเดิมการใช้เถ้าลอย 35 และ 50% ให้ค่าการขยายตัวที่อายุ 16 วัน เมื่อทดสอบด้วยวิธี ASTM C1260 มีค่า 0.17 และ 0.03% หรือเรียกได้ว่าไม่ขยายตัว เมื่อใช้วิธีการใหม่และใช้เถ้าลอยในสัดส่วนเดียวกันมาพิจารณาเปรียบเทียบกับการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงสัดส่วน 1.5% ที่อายุ 28 วันแล้วปรากฏว่าการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง 1.5 เปอร์เซนต์มีประสิทธิภาพลดการขยายตัวเป็น 50 และ 39 เปอร์เซนต์ ของมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าลอย 35 และ 50 เปอร์เซนต์ ซึ่งอาจประเมินทางอ้อมว่าซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงสามารถลดการขยายตัวได้ แม้จะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าการใช้เถ้าลอย 35 และ 50% เล็กน้อย เมื่อเทียบกับเถ้าลอยการทดสอบนี้แสดงว่าซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ปรับปรุงแล้วสามารถยับยั้งการขยายตัวได้ โดยสัดส่วนการใช้ซีโอไลท์ 1.5 และ 1.0 เปอร์เซนต์ให้การลดการขยายตัวใกล้เคียงกันและเป็นสัดส่วนยับยั้งการขยายตัวที่ดีที่สุด

หากเปรียบเทียบการทดสอบวิธีปรับปรุงมาตรฐาน ASTM C1260 ชุดตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ 35% ที่อายุ 16 วันหลังหล่อตัวอย่าง มีการขยายตัว 0.16% จะเท่ากับการทดสอบตามวิธีมาตรฐานการขยายตัวที่อายุ 16 วันมีค่า 0.17% และสำหรับชุดควบคุมที่อายุ 16 วันหลังหล่อตัวอย่าง วิธีทดสอบตามมาตรฐานและวิธีปรับปรุงมาตรฐาน ASTM C1260 การขยายตัวเท่ากับ 0.17 และ 0.40% ตามลำดับ ฉะนั้นตัวแปรเปรียบเทียบวิธีทดสอบทั้งสองน่าจะประมาณ 2.3 เท่า และหากพิจารณาชุดตัวอย่างที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ปูนซีเมนต์ 1.5% ด้วยวิธีปรับปรุงมาตรฐานการขยายตัวที่อายุ 16 วันหลังหล่อตัวอย่าง ประมาณ 0.24% หากเปรียบเทียบกับวิธีตามมาตรฐานคาดว่าอาจมีการขยายตัวประมาณ 0.10%

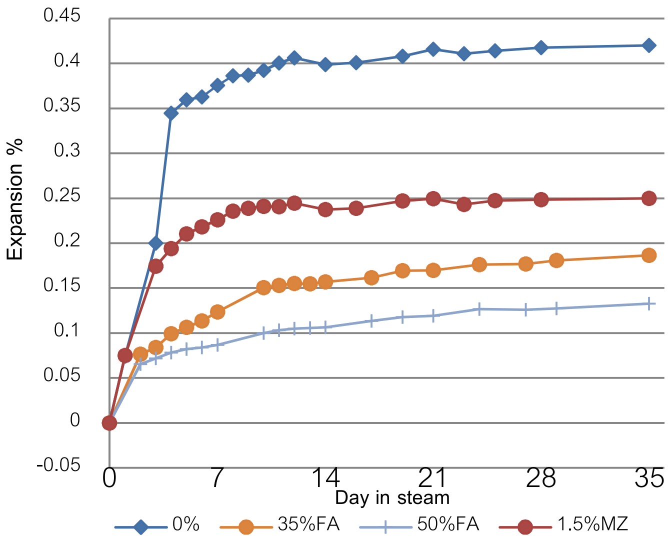
ดังนั้นอาจสามารถสรุปได้ว่าซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง 1.5% สามารถลดการขยายตัวเนื่องจาก ASR ได้ อย่างไรก็ตามหากเปรียบเทียบกับการลดการขยายตัวตามมาตรฐาน ASTM แล้วยัง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มีการขยายตัวมากกว่ามาตรฐาน ASTM C1260 ได้แนะนำไว้ที่ 0.1% ที่อายุ 16 วันหลังหล่อตัวอย่าง อนึ่งการใช้การเปรียบเทียบกับวิธีปรับปรุงมาตรฐานเป็นการเปรียบเทียบทางอ้อมเท่านั้น



ภาพที่ 31 การขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง โดยวิธี Modified ASTM C1260



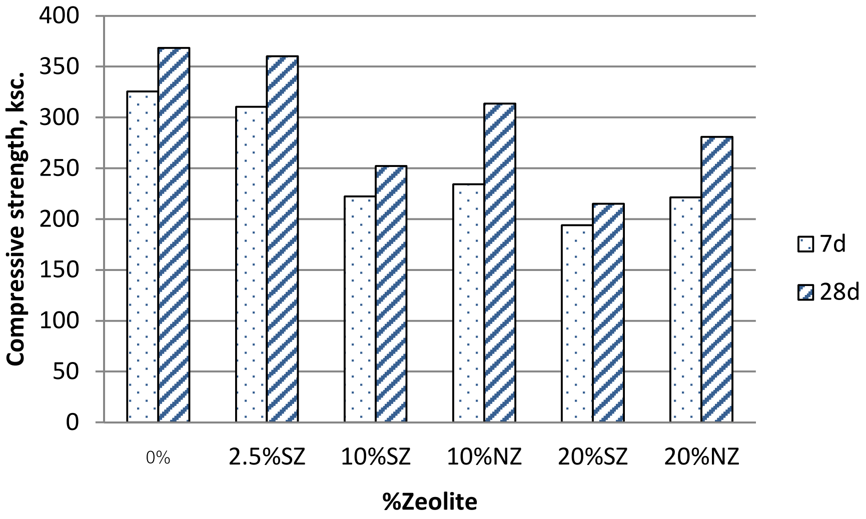
ภาพที่ 32 การขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและซีโอไลท์สังคาะห์ปรับปรุง โดยวิธี Modified ASTM C1260

3. การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมอร์ต้าร์รูปลูกบาศก์

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมอร์ต้าร์รูปลูกบาศก์ (Cube Mortar ASTM C109) เป็นการทดสอบพฤติกรรมความเป็นสารปอซโซลานในซีโอไลท์สังเคราะห์และซีโอไลท์ธรรมชาติเพื่อดูการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลา 28 วัน ที่สภาวะการบ่มตามปกติ พบว่าตัวอย่างชุดควบคุม (0%) มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 325.5, และ 368.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 7 และ28 วัน ส่วนชุดที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ (SZ) ในอัตราส่วน 2.5, 10 และ 20 ที่อายุ 7 วัน มีค่า 310.3, 222.3 และ 194.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ ที่อายุ 28 วัน มีค่า 360.1, 252.3 และ 215.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ ดังภาพที่ 33 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้ SZ ปริมาณน้อยมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเล็กน้อย ส่วนชุดที่ผสมซีโอไลท์ธรรมชาติ (NZ) ในอัตราส่วน 10 และ 20 ที่อายุ 7 วัน มีค่า 234.2 และ 221.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ ที่อายุ 28 วัน มีค่า 313.5 และ 280.9 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้ NZ ร้อยละ 10 เทียบกับ SZ มีกำลังอัดที่ 28 วันต่างกันมาก

การทดสอบนี้เป็นส่วนหนึ่งของการทดสอบพฤติกรรมความเป็นสารปอซโซลานที่จะสามารถพัฒนากำลังในช่วงอายุ 28 วัน โดยพิจารณาจากเกณฑ์ว่า หากชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้สารผสมเพิ่มมีคุณสมบัติปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์จะมีกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน (Strength Reactivity Index, SI) อย่างน้อย 75% ของชิ้นตัวอย่างปกติที่ใช้ซีเมนต์ล้วน (ASTM C618) ซีโอไลท์สังเคราะห์มีกำลังรับแรงอัดที่ 28 วันต่ำกว่า 75% ฉะนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าซีโอไลท์สังเคราะห์ไม่มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน แม้จะมีองค์ประกอบทางเคมี ขณะที่ชิ้นตัวอย่างที่ใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติ 10 และ 20 เปอร์เซนต์มีกำลังรับแรงอัดประมาณ 80 และ 75 เปอร์เซนต์ ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าซีโอไลท์ธรรมชาติมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

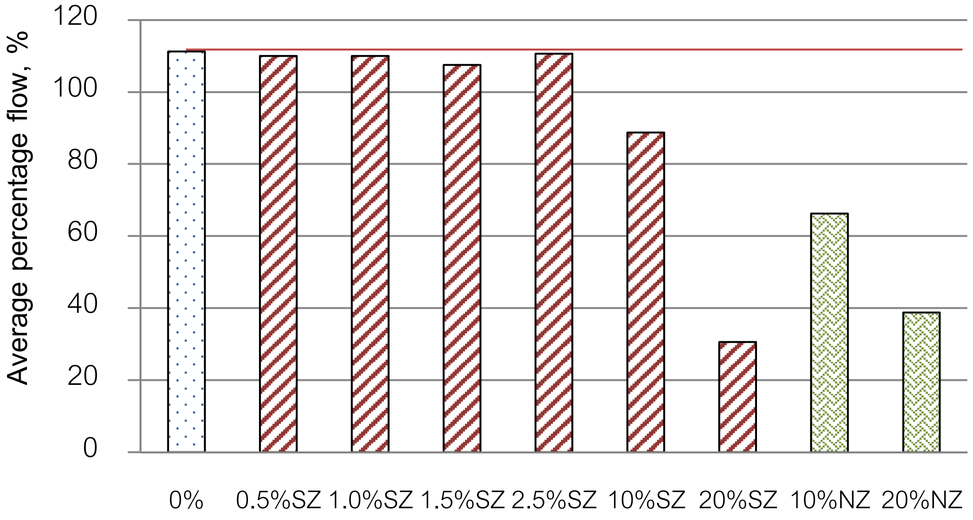


ภาพที่ 33 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของมอร์ต้าร์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์และซีโอไลท์ธรรมชาติ

4. การทดสอบความสามารถในการไหลเบื้องต้น

การทดสอบการไหลของซีเมนต์เพสต์ ด้วยวิธี mini slump แสดงในภาพที่ 34 เมื่อเปรียบเทียบให้ชุดควบคุม (0%) มีเปอร์เซนต์การไหลเท่ากับ 111.3% ชุดผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ก่อนปรับปรุง (SZ) 0.5, 1, 1.5, 2.5, 10 และ 20 เปอร์เซนต์ มีเปอร์เซนต์การไหลเป็น 110.0, 110.0, 107.5, 110.6, 88.8 และ 32.1 เปอร์เซนต์ตามลำดับ และชุดผสมซีโอไลท์ธรรมชาติ (NZ) 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ มีเปอร์เซนต์การไหลเป็น 66.3 และ 30.8 เปอร์เซนต์ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.5% ไม่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลของซีเมนต์เพสต์ใกล้เคียงชุดควบคุม (0%) แต่หากใช้ในปริมาณมากทั้งซีโอไลท์สังเคราะห์และซีโอไลท์ธรรมชาติจะทำให้พฤติกรรมการไหลของซีเมนต์เพสต์ลดลงชัดเจน โดยซีโอไลท์ธรรมชาติมีผลต่อการสูญเสียค่าการไหลมากกว่าที่ปริมาณแทนที่ 10% (20.2 และ 40.4%) แต่ที่ปริมาณแทนที่ 20% ซีโอไลท์ทั้งสองชนิดสูญเสียค่าการไหลใกล้เคียงกัน (72.5 และ 68.5%)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

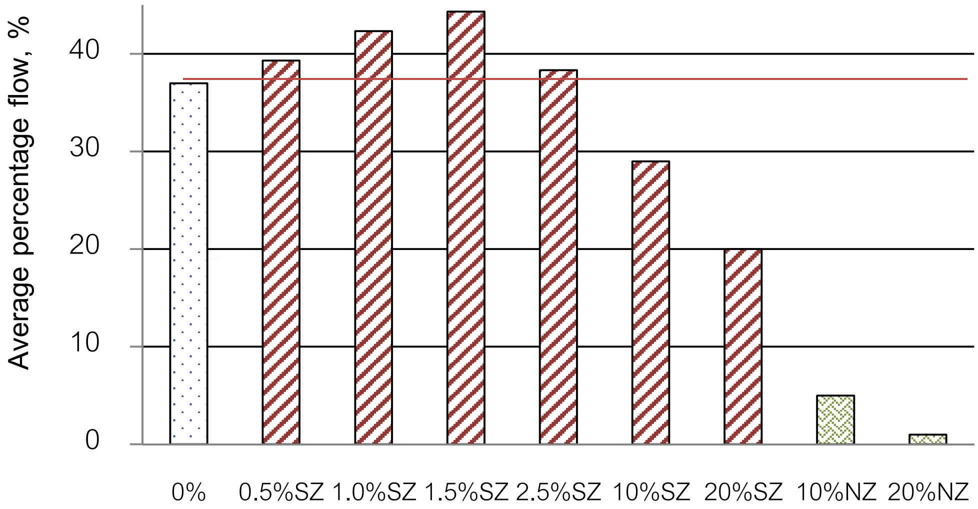


ภาพที่ 34 เปอร์เซนต์การไหลเฉลี่ยของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์และซีโอไลท์ธรรมชาติ

ส่วนการทดสอบการไหลของมอร์ต้าร์ด้วยโต๊ะไหล ดังแสดงในภาพที่ 35 พบว่าชุดควบคุมมีเปอร์เซนต์การไหลเท่ากับ 30.5% ชุดผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ 0.5, 1 และ1.5 เปอร์เซนต์ มีเปอร์เซนต์การไหลเป็น 37.0, 39.3, 42.3, 44.3, 38.3, 29.0 และ 20.0 เปอร์เซนต์ตามลำดับ และชุดผสมซีโอไลท์ธรรมชาติ 10 และ 20 เปอร์เซนต์ มีเปอร์เซนต์การไหลเป็น 5.0 และ 1.0 เปอร์เซนต์ตามลำดับ

ผลการทดสอบมอร์ต้าร์แสดงให้เห็นว่าการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้เปอร์เซนต์การไหลเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ในปริมาณน้อย เนื่องจากรูปร่างของซีโอไลท์สังเคราะห์มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ (ภาพที่ 21) แต่หากใช้ในปริมาณมากตั้งแต่ร้อยละ 10 จะทำให้เปอร์เซนต์การไหลลดลง ขณะที่การใช้ซีโอไลท์ธรรมชาตินั้นจะทำให้ค่าการไหลจะลดลงอย่างชัดเจนและลดลงมากกว่าซีโอไลท์สังเคราะห์ซึ่งคาดว่าเป็นผลเนื่องจากลักษณะทางกายภาพที่มีผิวขรุขระและใหญ่กว่าซีโอไลท์สังเคราะห์มากขนาด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 35 เปอร์เซ็นต์การไหลเฉลี่ยของมอร์ต้าร์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์และซีโอไลท์ธรรมชาติ

ในส่วนที่สอง การทดสอบพฤติกรรมการควบคุมการขยายตัวของมอร์ต้าร์ กำลังรับแรงอัดและความสามารถในการเทเบื้องต้น เป็นการบ่งบอกพฤติกรรมของมอร์ต้าร์เมื่อใช้ซีโอไลท์แต่ละชนิดแทนที่ปูนซีเมนต์ ในด้านการควบคุมการขยายตัวนั้นสามารถสรุปได้ว่าการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์โดยที่ยังไม่ทำการปรับปรุงก่อนนำไปใช้งานนั้นไม่สามารถลดการขยายตัวได้อย่างชัดเจน และหากใช้ในปริมาณมากจะยิ่งทำให้การขยายตัวเพิ่มขึ้น โดยการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงในอัตราส่วน 1.0% และ 1.5% จะทำให้การขยายตัวลดลงมากที่สุดแต่การลดการขยายตัวของซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงยังไม่เทียบเท่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นผลจากการที่ไม่ใช่สารปอซโซลานและสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนยังไม่ชัดเจน ส่วนการใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติสามารถลดการขยายตัวได้อย่างชัดเจนทั้งอัตราส่วน 10% และ20% เนื่องจากเมื่อพิจารณาความเป็นสารปอซโซลานแล้ว ซีโอไลท์ธรรมชาติมีความเป็นสารปอซโซลานสังเกตจากค่า Strength Reactivity Index กำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกำลังที่ 7 วัน และ 28 วัน ขณะที่ซีโอไลท์สังเคราะห์มีการเพิ่มกำลังอัดไม่ชัดเจนทั้งที่ 7 และ 28 วัน ด้านประสิทธิภาพการไหลการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์และซีโอไลท์ธรรมชาติในปริมาณมากจะทำให้ค่าการไหลลดลงอย่างชัดเจน เมื่อใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ในปริมาณน้อยค่าการไหลจะลดลงเล็กน้อยหรือคงที่ อย่างไรก็ตามการทดสอบที่ใช้ซีเมนต์เพสต์และใช้มอร์ต้าร์ยังมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์จะมีค่าการไหลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยขณะที่การทดสอบที่ใช้ซีเมนต์เพสต์มีค่าการไหลลดลง

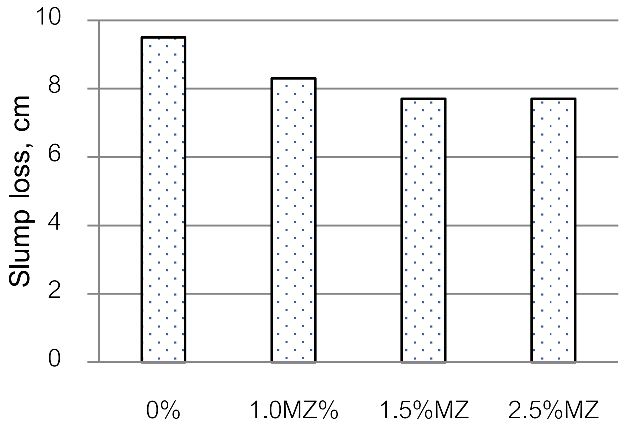
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เนื่องจากซีโอไลท์สังเคราะห์มีขนาดเล็ก (ภาพที่ 21) ทำให้สัดส่วนคละของมอร์ต้าร์ดีขึ้น แต่การใช้ในปริมาณมากก็ทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นจึงทำให้มีการดูดซึมน้ำมากขึ้นเช่นกัน

การทดสอบพฤติกรรมการควบคุมการขยายตัวของคอนกรีตในระยะเวลายาว คุณสมบัติทางกลและความสามารถในการเท

1. การทดสอบความสามารถในการเท

ค่าการทดสอบการยุบตัว โดยทดสอบคอนกรีตสดขณะก่อนเทเข้าแบบ โดยใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่ระบุไว้ในมาตรฐาน RILEM AAR4 ที่ผสม Na_2O ร้อยละ 1.25 พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตชุดควบคุม (0%) มีค่าเท่ากับ 9.5 เซนติเมตร และการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง (MZ) แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 1.0, 1.5 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีการยุบตัวมีค่าเท่ากับ 8.3, 7.7 และ 7.7 เซนติเมตร ตามลำดับ การยุบตัวของคอนกรีตสดเมื่อใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง การใช้ซีโอไลท์ในปริมาณน้อย (1.0, 1.5 และ 2.5%) การยุบตัวจะใกล้เคียงกัน โดยจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม



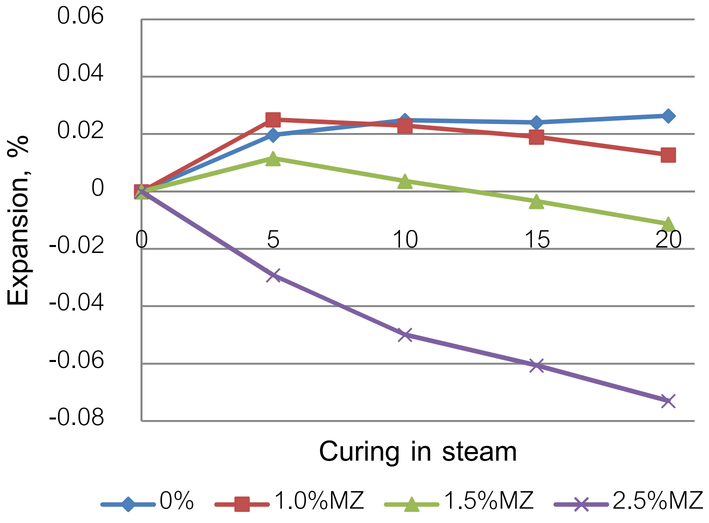
ภาพที่ 36 ค่าการยุบตัวเฉลี่ยของคอนกรีตที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. การทดสอบการขยายตัวของคอนกรีต

การทดสอบการขยายตัวของคอนกรีตปริซึมเป็นการทดสอบการขยายตัวในระยะเวลา 20 สัปดาห์ ดังภาพที่ 37 ค่าการขยายตัวของชุดควบคุม (0%) ที่อายุ 5, 10, 15 และ 20 สัปดาห์ มีค่าเท่ากับ 0.020, 0.025, 0.024 และ 0.026 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง (MZ) แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 5, 10, 15 และ 20 สัปดาห์ พบว่า การขยายตัวมีค่าเท่ากับ 0.025, 0.023, 0.019 และ 0.013 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 1.5 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 5, 10, 15 และ 20 สัปดาห์ พบว่า การขยายตัวมีค่าเท่ากับ 0.012, 0.004, -0.003 และ -0.011 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 2.5 เปอร์เซ็นต์ที่อายุ 5, 10, 15 และ 20 สัปดาห์พบว่าการขยายตัวมีค่าเท่ากับ -0.029, -0.050, -0.061 และ -0.073 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

การศึกษาส่วนนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ปูนซีเมนต์ทดสอบคอนกรีตในระยะเวลายาว เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากการขยายตัวเป็นการหดตัว ดังภาพที่ 37 โดยที่การขยายตัวจะค่อยๆลดลงอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 5 สัปดาห์ โดยการใช้ที่สัดส่วน 2.5% จะลดลงเห็นได้ชัดเจนตั้งแต่ 5 สัปดาห์ และมีพฤติกรรมการหดตัวอย่างต่อเนื่อง



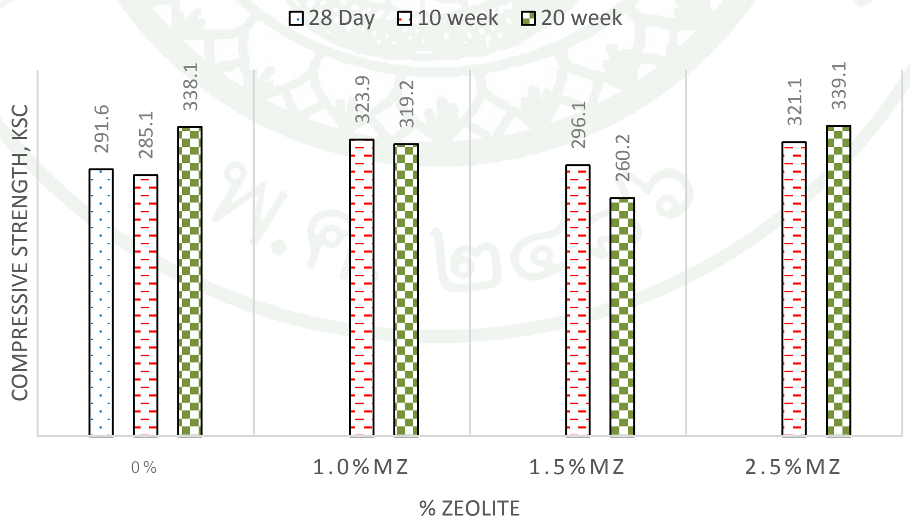
ภาพที่ 37 การขยายตัวเฉลี่ยของคอนกรีตปริซึมที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง

3. การทดสอบสมบัติทางกลของคอนกรีต

การทดสอบสมบัติทางกลของคอนกรีต 3 ลักษณะหลังจากเร่งปฏิกิริยา ASR ได้แก่ การทดสอบกำลังรับแรงอัด การทดสอบรับแรงดึง และการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) ให้ผลดังนี้

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตชุดควบคุม (0%) ที่อายุ 28 วันบ่มในน้ำและบ่มเร่งให้เกิดปฏิกิริยา ASR ในไอน้ำ 10 และ 20 สัปดาห์ ตามลำดับ มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 291.7, 285.1 และ 338.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง (MZ) แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 1.0, 1.5 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 10 และ 20 สัปดาห์ ดังภาพที่ 38 พบว่า กำลังรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 323.9, 319.2 และ 296.1, 260.2 และ 321.1, 339.1 ตามลำดับ

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตของชุดควบคุมที่ 20 สัปดาห์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่ 10 สัปดาห์ การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงในสัดส่วน 2.5% ให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม แต่การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงในสัดส่วน 1.5% ที่ให้ค่าลดลง ส่วนการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงในสัดส่วน 1.0% มีค่ากำลังอัดที่ 10 และ 20 สัปดาห์ใกล้เคียงกัน

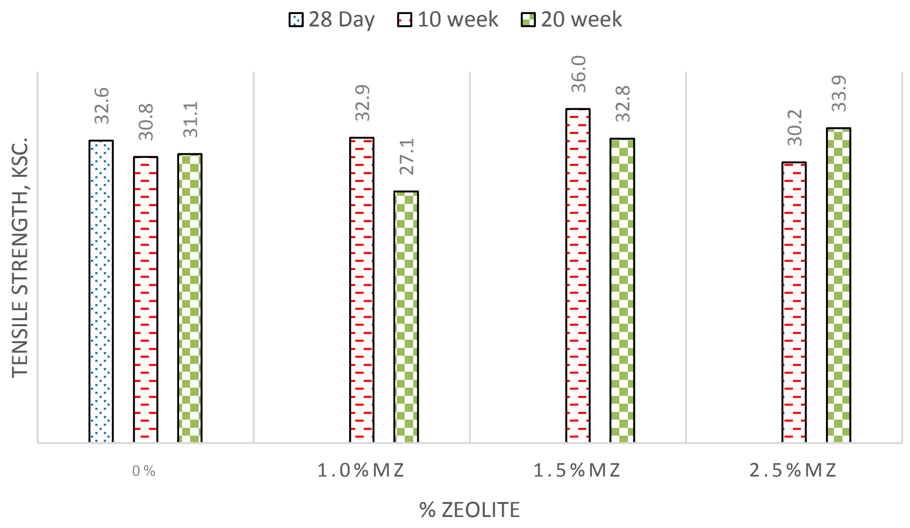


ภาพที่ 38 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตชุดควบคุม (0%) ที่อายุ 28 วันบ่มในน้ำและบ่มเร่งให้เกิดปฏิกิริยา ASR ในไอน้ำ 10 และ 20 สัปดาห์ ตามลำดับ มีกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 32.55, 30.81 และ 31.11 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยกำลังรับแรงดึงมีค่าลดลงเล็กน้อย การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง (MZ) แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 1.0, 1.5 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 10 และ 20 สัปดาห์ มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเช่นเดียวกับกำลังรับแรงอัด ดังภาพที่ 39 พบว่า กำลังรับแรงดึงมีค่าเท่ากับ 32.9, 27.1 และ 36.0, 32.8 และ 30.2, 33.9 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกันคือ ที่อายุ 20 สัปดาห์มีแนวโน้มลดลงจาก 10 สัปดาห์ยกเว้นกรณี 2.5%ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น

กำลังรับแรงดึงชุดควบคุมชิ้นตัวอย่างที่ 10 และ 20 สัปดาห์มีค่าใกล้เคียงเทียบกับชิ้นตัวอย่างที่บ่มในน้ำ 28 วัน การซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงสัดส่วน 1.0% และ 1.5% ที่ 20 สัปดาห์ มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงดึงที่ 10 สัปดาห์ แต่การซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงสัดส่วน 2.5% ทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 39 กำลังรับแรงดึงเฉลี่ยของคอนกรีตที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง

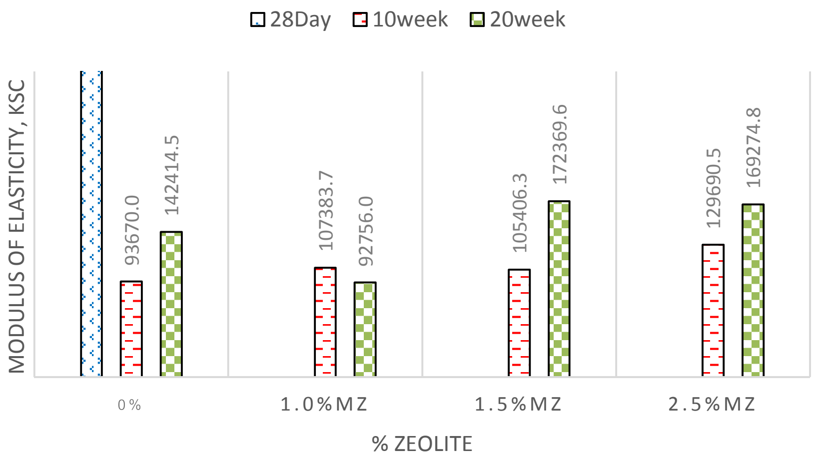
การทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตชุดควบคุม (0%) ที่อายุ 28 วันบ่มในน้ำและบ่มเร่งให้เกิดปฏิกิริยา ASR ในไอน้ำ 10 และ 20 สัปดาห์ ตามลำดับ มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 302968, 93670 และ 142414 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าการบ่มเร่งอุณหภูมิสูงมีผลต่อการลดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นอย่างชัดเจนจากผลของชุดควบคุมอายุ 28 วัน ในน้ำเทียบกับ อายุ 10 และ 20

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สัปดาห์ในไอน้ำ ผลจากลบของการเกิด ASR คือลดลงประมาณ 70 และ 50% ซึ่งต่างไปจากผลการศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดและค่ากำลังรับแรงดึง การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง (MZ) แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 1.0, 1.5 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 10 และ 20 สัปดาห์ ดังภาพที่ 40 พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 107,383, 92,756 และ 105,406, 172,369 และ 129,690, 169,274 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตชุดควบคุมที่อายุ 10 และ 20 สัปดาห์บ่มเร่งให้เกิดปฏิกิริยา ASR ในไอน้ำ มีค่าที่ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบ กับ 28 วันในน้ำ โดยที่คอนกรีตที่อายุ 20 สัปดาห์มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากกว่า การซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงสัดส่วน 1.5% และ 2.5% ที่ 20 สัปดาห์ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 10 สัปดาห์ แต่การซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงสัดส่วน 1.0% ทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลง หากเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของการซีโอไลท์ปรับปรุงแทนที่กับชุดควบคุมที่ 20 สัปดาห์ก็ปรากฏว่าการแทนที่ 1.5% และ 2.5% ทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเช่นกันและมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม

การศึกษานี้แสดงว่าการใช้ซีโฮไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงให้ผลดีในเรื่องการลดค่า E ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญหนึ่งของคอนกรีต โดยการแทนที่ 2.5% มีผลต่อการลดค่ E น้อยและน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงในระยะยาว (10 และ 20 สัปดาห์) ขณะที่การทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงในการแทนที่เดียวกันไม่แสดงผลดีของการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง



ภาพที่ 40 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การศึกษาส่วนที่สาม อาจสรุปได้ว่าการทดสอบพฤติกรรมการควบคุมการขยายตัวของคอนกรีตในระยะยาว (20 สัปดาห์) คุณสมบัติทางกล ตลอดจนความสามารถในการเท เป็นการทดสอบชิ้นตัวที่มีลักษณะใกล้เคียงสภาพความเป็นจริง กล่าวคือชิ้นตัวอย่างเป็นคอนกรีตมีมวลรวมหยาบเป็นส่วนประกอบ บ่มเร่งปฏิกิริยาภายใต้ระยะเวลานาน ในด้านการขยายตัวถึงแม้ว่าชุดควบคุมจะไม่ได้ให้การขยายตัวที่สูงมากเหมือนการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ซึ่งเป็นผลมาจากส่วนผสมและขนาดมวลรวม แต่การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงในสัดส่วน 1.0, 1.5 และ 2.5 เปอร์เซนต์ ช่วยลดการขยายตัวได้อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมและในระยะเวลายาวมีแนวโน้มการหดตัวทุกในส่วนผสมด้วย ในด้านคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต จากผลทดสอบอาจสรุปได้ว่ากำลังรับแรงอัดและแรงดึงค่อนข้างไปเป็นได้ในทิศทางเดียวกันคือสัดส่วน 1.0 และ 1.5 เปอร์เซนต์ ให้ค่ากำลังที่ลดลงและสัดส่วน 2.5 เปอร์เซนต์ ให้ค่ากำลังที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณากับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น พบว่าการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงสัดส่วน 1.0 เปอร์เซนต์ ให้ค่าลดลง แต่สัดส่วน 1.5 และ 2.5 เปอร์เซนต์ ให้ค่าเพิ่มขึ้น ในด้านการยุบตัวของคอนกรีตสด การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงทำให้การยุบตัวลดลงใกล้เคียงกันทุกสัดส่วน เพราะฉะนั้นจากการศึกษาส่วนนี้อาจสรุปได้ว่าการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงในสัดส่วน 2.5 เปอร์เซนต์ ให้ผลที่ดีที่สุดกับคอนกรีต

การศึกษานี้แสดงว่าการใช้ซีโฮไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงให้ผลดีในเรื่องการลดค่า E ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญหนึ่งของคอนกรีต โดยการแทนที่ 2.5% มีผลต่อการลดค่า E น้อยและน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง ขณะที่การทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงในการแทนที่เดียวกันไม่แสดงผลดีของการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลท์สังเคราะห์ในการควบคุมความเสียหายจากปฏิกิริยา ASR สรุปการศึกษาได้ดังนี้

1. ซีโอไลท์สังเคราะห์ (ซีโอไลท์ เอ) ไม่มีคุณสมบัติของสารปอซโซลาน มีผลช่วยลดการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ได้เล็กน้อย เมื่อใช้ในปริมาณต่ำกว่า 5 เปอร์เซนต์ สืบเนื่องจากซีโอไลท์ที่ใช้ในการศึกษามีปริมาณโซเดียมสูงมาก

2. ซีโอไลท์สังเคราะห์ (ซีโอไลท์ เอ) หลังปรับปรุงมีปริมาณโซเดียมไอออนลดลง มีผลึกเล็กลง การศึกษาการใช้สัดส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 1.0 และ 1.5 สามารถลดการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ได้ดีดังนั้นซีโอไลท์สังเคราะห์จึงต้องปรับปรุงก่อนนำไปใช้ลดการขยายตัวเนื่องจาก ASR

3. ซีโอไลท์ธรรมชาติ ชนิด Clinoptilolite มีคุณสมบัติของสารปอซโซลาน และสามารถลดการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ได้เมื่อใช้การแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 10 และ 20

4. การใช้ทั้งซีโอไลท์สังเคราะห์และซีโอไลท์ธรรมชาติในสัดส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 10 ขึ้นไปจะทำให้ประสิทธิภาพการไหลของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์ลดลง

5. ซีโอไลท์สังเคราะห์หลังปรับปรุง สามารถลดการขยายตัวของคอนกรีตปริซึมได้โดยการใช้สัดส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 1.0, 1.5 และ 2.5

6. การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์หลังปรับปรุง ในสัดส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 2.5 ทำให้กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตทรงกระบอกเพิ่มขึ้น จาก 10 และ 20 สัปดาห์

7. การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์หลังปรับปรุง ในสัดส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 1.5 และ 2.5 ทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอกเพิ่มขึ้น จาก 10 และ 20 สัปดาห์และสูงกว่าคอนกรีตชุดควบคุมในกรณี การเร่งให้เกิด ASR โดยเฉพาะทีอายุน้อย (10 สัปดาห์)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้เป็นรายงานการทดสอบใช้ซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อหาประสิทธิภาพการป้องกันปฏิกิริยา ASR ซึ่งพบทั้งผลดีและผลด้อยดังนั้นในการศึกษาต่อไปจึงรามีข้อเสนอแนะดังนี้

1.การปรับปรุงซีโอไลท์สังเคราะห์สามารถทำให้ปริมาณ Na^{+} ลดลงได้ แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากซีโอไลท์ เอ มีปริมาณ Na^{+} สูง และกระบวนการที่ใช้ไม่อาจลดปริมาณ Na^{+} ได้ทั้งหมด การศึกษาต่อไปจึงควรพิจารณาเลือกซีโอไลท์ที่มีปริมาณ Na^{+} ที่ต่ำลง

2.หากสามารถเตรียมชิ้นงานโดยไม่ทำความเสียหายแก่ชิ้นตัวอย่างได้ ควรทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงขนาด ASR เจล ซึ่งเป็นการยืนยันผลการทดลองทางกลและทางกายภาพ

3.นอกเหนือจากวิธีการปรับปรุงซีโอไลท์สังเคราะห์ในวิทยานิพนธ์แล้ว ยังมีอีกหลายวิธีที่ไม่ได้เลือกมาทดสอบ ดังนั้นในการศึกษาต่อไปอาจเลือกวิธีการปรับปรุงซีโอไลท์วิธีอื่นๆ มาทดสอบเปรียบเทียบเพิ่มเติม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี 2544. **ธรณีวิทยาประเทศไทย เฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว เนื่องในโอกาสพระราชพิธีมหามงคล เฉลิมพระชนมพรรษา 6 รอบ 5 ธันวาคม 2542.** กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

ประทีป ดวงเดือน 2531. **เอกสารคำสอน วิชา วศยธ.351 ธรณีวิทยาทางวิศวกรรม.** ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน, กรุงเทพฯ.

มัณฑนีย์ เศรษฐภักดี 2554. **ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก.** แหล่งที่มา: http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/650-ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก?groupid=178, 8 ตุลาคม 2556

ศิรินุช ลอยหา 2556. ซีโอไลต์และเทคโนโลยีซีโอไลต์. **ว.วิทย. มข.** 41(1) 56-66

ศุภชัย ไทยพุ่ม 2556. **คุณสมบัติและอิทธิพลของเหล็กเสริมที่มีต่อการขยายตัวจากปฏิกิริยา ASR ในคอนกรีต** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุวิมล สัจจวาณิชย์, กฤษณ์ วันอินทร์ และดวงฤดี ฉายสุวรรณ 2555. **ปัญหาจากแหล่งมวลรวมและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างจากปัญหาอัลคาไลน์ซิลิก้าในประเทศไทย**. สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

__________, วัชรากร วงศ์คำจันทร์, กฤษณ์ วันอินทร์, มนสิช สาริกภูติ และโรจนากร กันตพงษ์. 2553ข. การใช้เจลเรืองแสงตรวจสอบปรากฏการณ์ ASR ของโครงสร้างเดิม. น. 1-8. *ใน* **บทความรับเชิญการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6. 20-22 ตุลาคม 2553.** ม.ป.ท

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุวิมล สัจจวาณิชย์,, ปิยะ โชติกไกร, และวรพงศ์ ศรีโสร. 2555. การศึกษาปัญหาของ ASR ต่อสาเหตุการวิบัติของโครงสร้างคอนกรีต : กลไกการตรวจสอบและป้องกัน.รายงานของภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เสนอต่อสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. **สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.** กรุงเทพฯ

ไพศาล คงคาฉุยฉาย และเมตตา เจริญพานิช 2556. **เอกสารประกอบการบรรยาย เรื่อง "ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับซีโอไลท์".** ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ

รังสรรค์ ทองพวง และสุวิมล สัจจาวาณิชย์ 2557. การควบคุมการขยายตัวจากปัญหา ASR ในมอร์ต้าร์โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย. **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่10 20-22 ตุลาคม 2557.**

วัชรากร วงศ์คำจันทร์ 2557. **อิทธิพลของมวลรวมจากเขตรอยเลื่อนและคลอไรด์ ต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา** วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วรางคณา แสงสร้อย และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล 2555. **การทดสอบการเกิดปฏิกิริยาระหว่างด่างและมวลรวม.** ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, **วารสารคอนกรีต** 15.

วุฒินันท์ ทัศดร และสุวิมล สัจจวาณิชย์ 2557. พฤติกรรมการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่ใช้หินปูนร่วมกับเศษแก้ว. **การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่19 14-16 พฤษภาคม 2557.**

Ajemba, R.O. and O.D. Onukwuli 2012. Process Optimization of Sulphuric Acid Leaching of Alumina from Nteje Clay Using Central Composite, **International Journal of Multidisciplinary Science and Engineering.** 3(5) 1-7.

American Society of testing and materials (ASTM). 2001. ASTM C1260-01 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregate (Mortar-Bar Method), **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, USA.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

American Society of testing and materials (ASTM). 2002. ASTM C109-02 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, USA.

_________. 2002. ASTM C469-02 Standard Test
Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, USA.

_________. 2003. ASTM C618-03 Standard Specification for Coal Fly and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, USA.

_________. 2004. ASTM C496/C496M-4 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, USA.

_________. 2014. ASTM C230/C230M-14 Standard Specification for Flow Table for Use in tests of Hydraulic Cement, **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, USA.

_________. 2014. ASTM C39/C39M-14 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, USA.

Berube, M.A. and B. Fournier 1993. Canadian Experience with Testing for Alkali Aggregate Reactivity in Concrete, **Cem. Concr. Compos.** 15 27-47.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Berube, M.A., J.F. Dorion and M. Rivest 2000. Distribution of alkalis in concrete structuresaffected by alkali-silica reactivity and contribution by the aggregates, in: M.-A.Berube, B. Fournier, B. Durand (Eds.), **11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete**, Canada, pp. 139-148.

_________, J. Frenette, M.Rivest and D. Vezina 2000. Measurement of the active alkali content of concrete using hot-water extraction, in: M. A. Berube, B. Fournier,B. Durand (Eds.), **11th International Conference on Alkali-Aggregate reaction in Concrete**, Canada, pp. 159-168.

_________, J. Dorion, J.F. Duchesne and M. Rivest 2002. Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali–silica reactivity, **Cem. Concr. Res.** 32 1215-1227.

Borchers, I.and C. Muller 2009. Einfluss von Natrium und Kalium auf eine schädigende AKR in Abhängigkeit von der Gesteinskörnung, Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg): **Proceedings at the 17 Internationale Baustofftagung** : (Weimar 23-26092009), Weimar, Germany, pp. S. 2-0211-0212-0216.

Bremseth, S. 2010. Perfomance testing of laboratory made and full scale production of fly ash cement at the Kjopsvik plant. **Norcem AS internal R&D project report no.9RD4/R10034,** Brevik, Norway. p. 35.

Broekmans, M.A.T.M. 2002. The alkali-silica reaction: mineralogical and geochemical aspects of some Dutch concretes and Norwegian my lonites, PhD. Thesis, in, **University of Utrecht**, pp. 144.

_________. 2004. Structural properties of quartz and their potential role for ASR, **Mater. Charact.** 53 129-140.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Broekmans, M.A.T.M. 2013. Introduction to AAR mineralogy, **International Seminar on AAR Deterioration of Concrete Structures15-16 August 2013**, Kasetsart University, Bangkok

Chotickai, P. 2013. Research NDT investigation. **International Seminar on AAR Deterioration of Concrete Structures 15-16 August 2013.** Kasetsart University, Bangkok

Crucq P. 2005. “Development of a method to measure the mechanical behavior of ASR gels.” Microlab Civil Engineering and Geosciences. *In* **Application Materials and Structures.**

Diamond, S.and N. Thaulow, 1974. A study of expansion due to alkali-silica reaction as conditioned by the grain size of the reactive aggregate, **Cem. Concr. Res.** 4 591-607.

__________, R.S. Barneyback Jr and L.J. Struble 1981. On the physics and chemistry of alkali-silica reactions. **Proceedings of the Fifth Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete**,S252/22, pp. 1-11.

Dove, P.M. and J.D. Rimstidt 1994. Silica-water interactions, in: P.J. Heaney, C.T. Prewitt, G.V. Gibbs (Eds.), Silica: physical behaviour, geochemistry and materialsapplications Reviews in Mineralogy**, Mineralogical Society of America**, pp.259-308.

Feng, N.and T. Hao. 1998. Mechanism of natural zeolite power in preventing alkali-silica reaction in concrete. **Advances in Cement Research.** 10(3) 101-108.

Feng, X., N., Feng and D.,Han 2003. Effect of the Composite of Natural Zeolite and Fly Ash on Alkali-Silica Reaction. **Journal of Wuhan University of Technology.** 18(4) 93-96.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Federal Highway Administration 2013. **Chapter 2 Alkali-Silica Reaction.** Source: http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/03047/02. cfm, 3 August 2013.

French, W.J. 1989. Maintenance of mobile alkali concentration in cement paste during Alkali-aggregate reactions, in: K. Okada, S. Nishibayashi, M. Kawamura (Eds.), Paper distributed at the **8th International conference on Alkali-Aggregate Reaction**, Kyoto, Japan.

Gillott, J.E. 1975. Alkali-aggregate reactions in concrete. **Eng. Geol.** 9 303-326.

Georgiev, D., B. Bogdanov, K. Angelova and I Markovska, Y. Hristov 2009. Stnthetic Zeolite – Structure, Clasification, Current Trends in Zeolite Synthetic Review. **International Science Conference 4-5 June 2009.** Bulgaria.

Glasser, F.P., 1992. Chemistry of the alkali-aggregate reaction, in: R.N. Swamy (Ed.), The Alkali-Silica Reaction in Concrete, **Blackie and Son Ltd, London**, p. 333.

Grattan-Bellew, P.E. 1994. Alkali contribution from limestone aggregate to pore solution of old concrete, ACI Mater. J., Am. **Concr. Inst.** 91 173-177.

_________. 2001. Petrographic and Technological Methods for Evaluation of Concrete Aggregates, in: V.S. Ramachandran, J.J. Beaudoin (Eds.), Handbook of analytical techniques in concrete science and technolog Principles,Techniques and Applications, **Noyes Publications.** 63-98.

Hao, T. 2008. **International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites.** Study on the effect and mechanism of natural zeolite on suppressing alkali- aggregate reaction RILEM Publications.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Hobbs, D.W. 1981. Expansion due to alkali-silica reaction and the influence of pulverized fuel ash. **Proceedings of the Fifth International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete**, S252/30, 1-10.

_________, 1988. Alkali–silica Reaction in Concrete, **Thomas Telford Ltd, London.**

Hollis, N., D. Walker, L. Stephen and E.S. Paul 2004. Petrographic Methods of Examining Hardened Concrete, **A Petrographic Manual Revised**

Hou, X., L.J. Struble and R.J. Kirkpatrick 2004 Formation of ASR gel and the roles of C-S-H and portlandite, **Cem. Concr. Res.** 34 1683-1696.

Ikotun, B.D and. S. Ekolu 2010. Strength and durability effect of modified zeolite additive on concrete properties **Construction and Building Materials.** 24 749-757.

Kamali, S., B. Gerard and M. Moranville 2003. Modelling the leaching kinetics of cement based materials-influence of materials and environment, **Cem. Concr. Compos.** 25 451-458.

Kamali, S., M. Moranville and S. Leclercq 2008. Material and environmental parameter effects on the leaching of cement pastes: experiments and modelling, **Cem. Concr. Res.** 38 575-585.

Kantro,D.L. 1980. Influence of water reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test, **Cement, Concrete and Aggregate.** 2 95-102.

Kawamura, M., M. Koike and K. Nakano 1989. Release of alkalis from reactive andesitic aggregates andfly ashes into pore solution in mortars, in: K. Okada, S. Nishibayashi, M. Kawamura (Eds.), **8th International conference on Alkali-Aggregate Reaction, Society of Materials Science**, Kyoto, Japan, 271-278.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Lagerblad, B. J. and Tragardh 1992. Slowly reacting aggregates in Sweden-mechanism and conditions for reactivity in concrete, in: A.B. Poole (Ed.), 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction *in* **Concrete, Concrete Society Publication CS.104**, London, 1992, 570-578.

Lee, N. 2009. Alkali-Silica Reaction in Concrete. **BRANZ Ltd,** New Zealand.

Leemann, A. and B. Lothenbach 2008. The influence of potassium-sodium ratio in cement on concrete expansion due to alkali-aggregate reaction. **Cem. Concr. Res.** 38: 1162-1168.

Lindgard, J., P.J. Nixon, I. Borchers, B. Schouenborg, B.J. Wigum, M.Haugen and U. Akesson 2010. The EU"PARTNER"Project-European standard tests to prevent alkali reactions in aggregates: Final results and recommendations, **Cem. Concr. Res.** 40 611-635.

_________, O.A.Çakır, I.Fernandes, T. F. Ronning and M.D.A. Thomas 2012. Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing, **Cem. Concr. Res.** 42 223-243.

Lu, D., X. Zhou, Z. Xu, X. Lan, M. Tang and B. Fournier 2006. Evaluation of laboratory test method for determining the potential alkali contribution from aggregate and the ASR safety of the Three-Gorges dam concrete, **Cem. Concr. Res.** 36 1157-1165.

_________, B. Fournier, P. Grattan-Bellew, Y. Lu, Z. Xu and M. Tang 2008. Expansion behavior of Spratt and Pittsburg limestones in different test procedures, in: M.A.T.M. Broekmans, B.J. Wigum (Eds.), **13th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete**, Trondheim, Norway, 619–627.

Manley, R., J. Holmes 1989. Minerals with natural advantage, **New Scientist.** 25 39-43.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Mindess, S., J.F. Young and D. Darwin 2003. Concrete, Prentice Hall, **Upper Saddle River, New Jersey.**

Multon, S., M. Cyr, A. Sellier, P. Diederich and L. Petit 2010. Effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion, **Cem. Concr. Res.** 40 508–516.

Niu, Q. and N. Feng 2005. Effect of modified zeolite on the expansion of alkaline silica reaction. **Cem. Concr. Res.** 35 1784-1788.

Paweena, N. and A. Chaisena 2012. Sulfuric Acid and Ammonium Sulfate Leaching of Alumina from Lampang Clay, **E-Journal of Chemistry.** 9(3) 1364-1372.

Perraki, T., E. Kontori, S. Tsivilis and G. Kakali 2010. The effect of zeolite on the properties and hydration of blended cements. **Cement & Concrete Composites** 32 128-133.

Powers, T.C. and H. H. Steinour 1955. An interpretation of some published researches on the alkali-aggregate reaction part I-the chemical reactions and mechanism of expansion, J. Am. **Concr. Inst.** 51 497-516.

RILEM TC 191-ARP. 2003. Alkali-reactivity and prevention - Assessment, specification and diagnosis of alkali-reactivity, pp.472-479. *In* **AAR-4.1 Detection of potential alkali-reactivity - 60 C test method for aggregate combinations using concrete prisms.** Materials and Structures / Mat6riaux et Constructions.

Rivard, P., M. A. Berube, J. P. Ollivier and G. Ballivy 2003. Alkali mass balance during the accelerated concrete prism test for alkali-aggregate reactivity, **Cem. Concr. Res.** 33 1147-1153.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Sangsuwan, C and S. Sujjavanich 2011. Effects of Moderate Calcium Oxide Fly Ash on Expansion of Mortar Bar Due To Thai Reactive Aggregate, **Engineering Journal** 16(3) 101-107.

Sellevold, E. 1993. Resistivity and humidity measurements of repaired and nonrepaired areas in Gimsystraumen bridge, **International Conference: Repair of concrete structures, from theory to practice in a marine environment**, Svolvær,Norway.

Shayan, A and J. Grimstad, 2006. Deterioration of Concrete in a Hydroelectric Concrete Gravity Dam and its Characterization, **Cem. Concr. Res** 36(2) 371-383.

Slamecka, T. and F. Skvara 2002. The effect of water ratio on microstructure and composition of the hydration products of portland cement pastes, **Ceramics-Silikaty** 46 152-158.

St John, D.A., A.B. Poole and I. Sims 1998. Concrete Petrography-**A Handbook of Investigative Techniques,** Arnold, U.K, p. 474.

Stanton, T.E. 1940. The expansion of concrete through reaction between cement and aggregate, **American Society of Civil Engineers** 66 1781-1811.

Stark, D. 1991. The moisture condition of field concrete exhibiting alkali–silica reactivity, Second International Conference on Durability of Concrete, 126/52, **ACI Publication SP**, 973-987.

_________, 1995. Effects of water–cement ratio on expansion due to ASR, Concrete Technology Today, **Portland Cement Association**, Skokie, Illinois, 3-5.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Stark, J., D. Erfurt, E. Freyburg, C. Giebson, K. Seyfarth and B. Wicht 2008. Alkali-KieselsäureReaktion (Alkali-Silica Reaction), Series of publications No. 3, Bauhaus University, **F.A. Finger Institute for building materials science**, Weimar, 173-180.

Sujjavanich, S., W.-I. Krit and W.Wongkamjan, 2012. The application of fluoresced gel for the first alkali silica reaction evidence in Thailand. **Advanced Materials Research**. 613-616.

Swamy, R.N. and M. M. Al-Asali 1988. Expansion of concrete due to alkali silica reaction. **ACI Materials Journal** 85(5) 367-374.

Swamy, R.N., 1992. The Alkali-Silica Reaction in Concrete. **Blackie and Son Ltd, London.**

Szostak, R. 1998. Molecular Sieves Principles of Synthesis and Identification. **Blackie Academic & Professional, London**

The University of Auckland 2013.**Igneous rocks.** Source: http://flexiblelearning.auckland.ac.nz/rocks_minerals/rocks/igneous.html, 3 August 2013

Thomas, M.D.A. and M. H. Shehata 2004. Use of blended cements to control expansion of concrete due to alkali–silica reaction, **8th CANMET/ACI Int Conf on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Supplementary Papers**, Las Vegas, 591-607.

__________, B. Fournier, K. Folliard, J. Ideker and M. Shehata 2006. Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete, **Cem. Concr. Res.** 36 1842-1856.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Thomas, M.D.A., and K.J. Folliard 2007. Concrete aggregates and the durability of concrete, in: C.L. Page, M.M. Page (Eds.), **Durability of Concrete and Cement Composites**, Woodhead, Cambridge, UK, 247-281.

__________, A. Dunster, P. Nixon and B. Blackwell 2011. Effect of fly ash on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction exposure site studies, **Cem.Concr.Compos**. 33 359-367.

Vivian, H.E. 1951. Studies in cement aggregate reaction. XVI. The effect of hydroxyl ions on the reaction of opal. **Aust. J. Appl. Sc**i. 2 108-113.

Wang, Y., G. Yu, M. Deng, M. Tang and D. Lu 2008. The use of thermodynamic analysis in assessing alkali contribution by alkaline minerals in concrete, **Cem. Concr. Compos.** 30 353-359.

West, G. 1996. Alkali_Aggregate Reaction in Concrete Roads and Bridges, **Thomas Telford Publications. London.** pp. 22-42.

Wongtanasarasin, C and S. Sujjavanich 2014. Effect of Synthetic Zeolite on an ASR Expansion and Compressive Strength, **Annual Concrete Conference 10 20-22 October 2014.**

Yamada, K. 2011. ASR Problems in Japan, **In Proceeding of the 7th Annual Concrete Conference**, Rayong, pp. Keynote 26.

Yang, Y., X. Zhenjian, C. Weizhong and C. Min 2005. Distribution of water content in self-compacted high strength concrete due to water evaporation and self-desiccation, RILEM ProceedingsPR042, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, **SCC'2005**, Changsha.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Zhimin, Y., D. Ma, J. Zhuang, X. Liu, X. Liu, X. Han, X. Bao, F. Chang, L. Xu and Z. Liu 2003. On the acid-dealumination of USY zeolite: a solid state NMR investigation, **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical.** 194 153-167.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

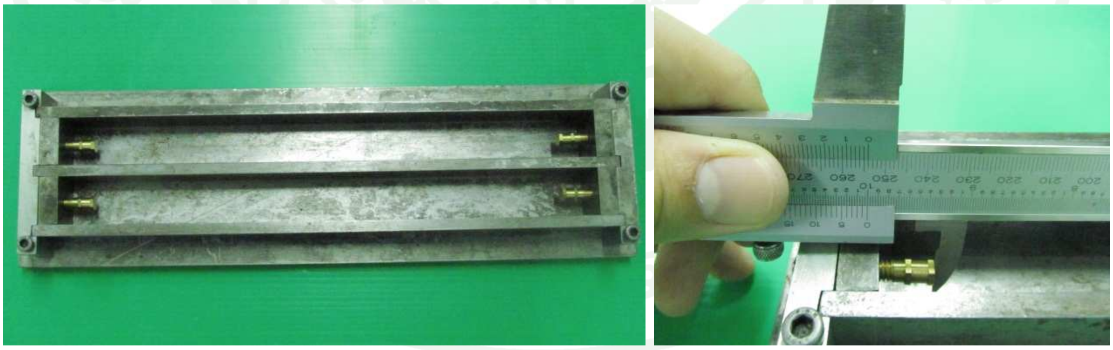
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ ก1 อุปกรณ์การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์



ภาพผนวกที่ ก2 แบบหล่อแท่งมอร์ต้าร์ และการวัดระยะห่างระหว่างหมุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ ก3 แบบหล่อลูกบาศก์มอร์ต้าร์ และการทดสอบลูกบาศก์มอร์ต้าร์

ภาพผนวกที่ ก4 แบบหล่อคอนกรีตปริซึม และภาชนะบ่มด้วยไอน้ำ

ภาพผนวกที่ ก5 ตู้เร่งปฏิกิริยาควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

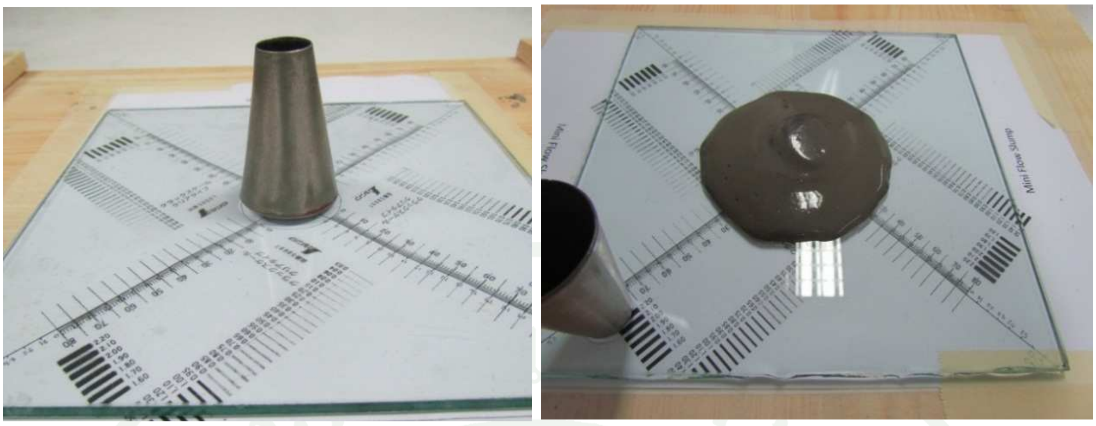
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ ก6 แบบหล่อทรงกระบอก และเครื่องผสมคอนกรีต

ภาพผนวกที่ ก7 การควบคุมอุณหภูมิหลังนำออกจากตู้ควบคุมอุณหภูมิ

ภาพผนวกที่ ก8 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ก9 อุปกรณ์การทดสอบการไหลของซีเมนต์เพส และการทดสอบการไหล

ภาพผนวกที่ ก10 อุปกรณ์การทดสอบการไหลของมอร์ต้าร์ และการทดสอบการไหล

ภาพผนวกที่ ก11 อุปกรณ์สำหรับทดสอบการกระตุ้นซีโอไลท์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกระตุ้นซีโอไลท์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย
IRON AND STEEL INSTITUTE OF THAILAND

TESTING CENTER

Page 2 of 5

Attachment : Chemical composition test results

ISIT No. 2233/2014

July 7, 2014

Request No. : 572241
Test Date : July 3, 2014
Testing Laboratory : 1st Fl. Bureau of Industrial Sectors Development Building
Customer : Faculty of Engineering, Kasetsart University
Sample : Portland Cement, Silica Fume, Synthetic Zeolite, Natural Zeolite, Soda lime glass, Fly ash (TCA), Fly ash (FCM) and Fly ash (FFA)

Tested by : X-Ray Fluorescence Spectrometer : PANalytical, Model : Axios (Standardless Program : Omnian)

Unit : % by weight

Sample Name	Portland Cement	Silica Fume	Synthetic Zeolite	Natural Zeolite
Operation No.	TC 5712921	TC 5712922	TC 5712923	TC 5712924
Element	Result	Result	Result	Result
Na_2O	0.33	0.26	31.29	0.63
MgO	1.79	0.49	0.06	1.37
Al_2O_3	6.06	0.19	30.39	13.01
SiO_2	29.61	97.26	38.13	78.51
P_2O_5	0.10	0.11	-	0.02
SO_3	3.36	0.49	0.02	0.01
Cl	0.06	0.02	0.02	0.02
K_2O	0.62	0.62	0.03	1.39
CaO	53.51	0.43	0.02	3.39
TiO_2	0.30	-	0.01	0.18
MnO	0.07	0.02	-	0.03
Fe_2O_3	3.30	0.03	0.02	1.29
NiO	0.01	-	-	-
CuO	0.01	-	-	-
ZnO	0.02	0.01	-	0.01
Rb_2O	-	-	-	0.01
SrO	0.04	-	-	0.03
As_2O_3	-	0.02	-	-
PbO	-	0.03	-	-
BaO	-	-	-	0.05

1. The above results are valid exclusively for tested/analysed samples as mentioned in this report.
2. Publication of the results on testing and analysis is prohibited unless written permission is obtained from the governor of ISIT

S.Thanaporn

ภาพผนวกที่ ข1 ผล XRF ของปูนซีเมนต์ ซีโอไลท์สังเคราะห์ และซีโอไลท์ธรรมชาติ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย
IRON AND STEEL INSTITUTE OF THAILAND

TESTING CENTER Page 2 of 3

Attachment : Chemical composition test results

ISIT No. 2315/2014 July 16, 2014

Request No. : 572346

Test Date : July 16, 2014

Testing Laboratory : 1st Fl. Bureau of Industrial Sectors Development Building

Customer : Faculty of Engineering, Kasetsart University

Sample : Modified Zeolite

Tested by : X-Ray Fluorescence Spectrometer : PANalytical, Model : Axios (Standardless Program : Omnian)

Unit : % by weight

Sample Name	Modified Zeolite
Operation No.	TC 5713612
Element	Result
Na_2O	19.88
Al_2O_3	33.89
SiO_2	43.45
SO_3	0.02
Cl	2.68
K_2O	0.01
CaO	0.03
TiO_2	0.01
Fe_2O_3	0.02

1. The above results are valid exclusively for tested/analysed samples as mentioned in this report.
2. Publication of the results on testing and analysis is prohibited unless written permission is obtained from the governor of ISIT

S.Thanaporn

[illegible]

1st-2nd Fl. Bureau of Industrial Sectors Development Building, Soi Trimit, Rama IV Road, Prakanong, Klong-Toey, Bangkok 10110. Tel: 02 712-4402-7, 02 713-6290-2 Tele fax: 02 713-6294

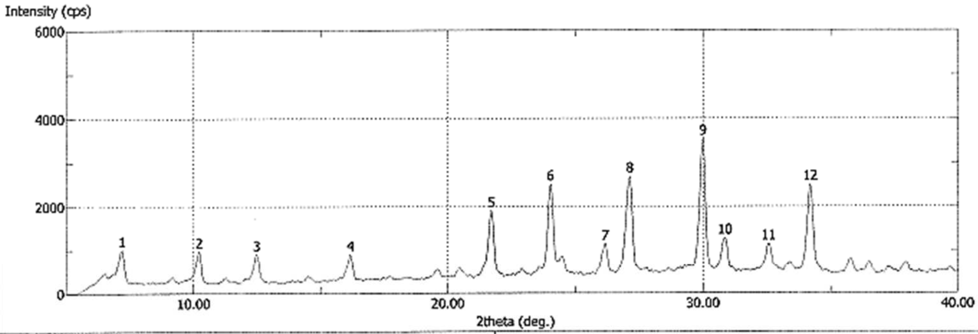
F96-17025-TC-002 (24/01/49) Rev.01

ภาพผนวกที่ ข2 ผล XRF ของซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Peak Search

Sample : Zeolite From. KSU　File : ZeoliteFrom.KSU-0　Date : July-14-14 09:22:58　Operator : Administrator
Comment : ZEOLITE　Memo :
Method : 2nd differential　Typical width : 0.122 deg.　Min. height : 577.83 cps



Peak no.	2theta	Flex Width	d-value	Intensity	I/Io
1	7.200	0.212	12.2675	1003	29
2	10.220	0.188	8.6482	972	28
3	12.480	0.212	7.0867	901	26
4	16.180	0.141	5.4735	894	26
5	21.720	0.235	4.0883	1895	54
6	24.020	0.235	3.7018	2498	71
7	26.180	0.141	3.4011	1139	33
8	27.140	0.282	3.2829	2684	76
9	30.000	0.212	2.9761	3534	100
10	30.860	0.282	2.8951	1269	36
11	32.560	0.235	2.7477	1137	33
12	34.200	0.235	2.6196	2505	71

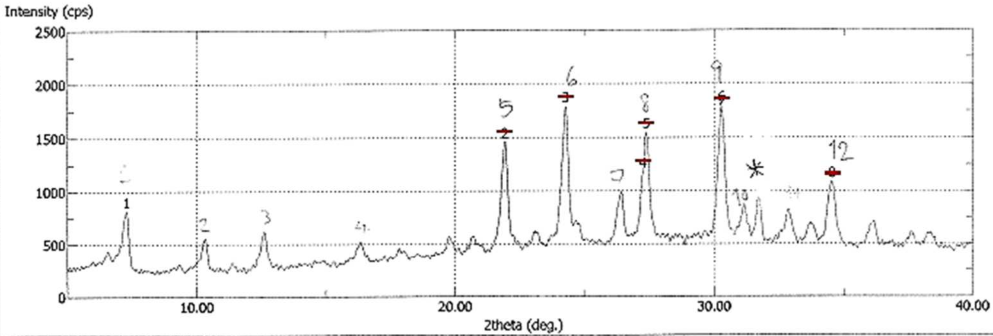
Peak no.	2theta	Flex Width	d-value	Intensity	I/Io

Sample No. 1 = Zeolite บริสุทธิ์: Pattern ของ peak จะขึ้นครบทุก peak และชัดเจน และ base line ต้องเรียบ ซึ่งวัดค่า Crystallinity "A" = 98%

July-14-2014 09:34:45 Page-1

Peak Search

Sample : ModifileZeolite　File : ModifileZeolite-0　Date : July-14-14 09:44:36　Operator : Administrator
Comment : ZEOLITE　Memo :
Method : 2nd differential　Typical width : 0.139 deg.　Min. height : 563.50 cps



Peak no.	2theta	Flex Width	d-value	Intensity	I/Io
1	7.280	0.118	12.1328	818	46
2	21.920	0.282	4.0515	1455	82
3	24.280	0.212	3.6628	1789	100
4	27.260	0.071	3.2687	1178	66
5	27.380	0.259	3.2547	1546	87
6	30.280	0.259	2.9493	1791	100
7	30.300	0.071	2.9474	1761	99
8	34.540	0.235	2.5946	1085	61

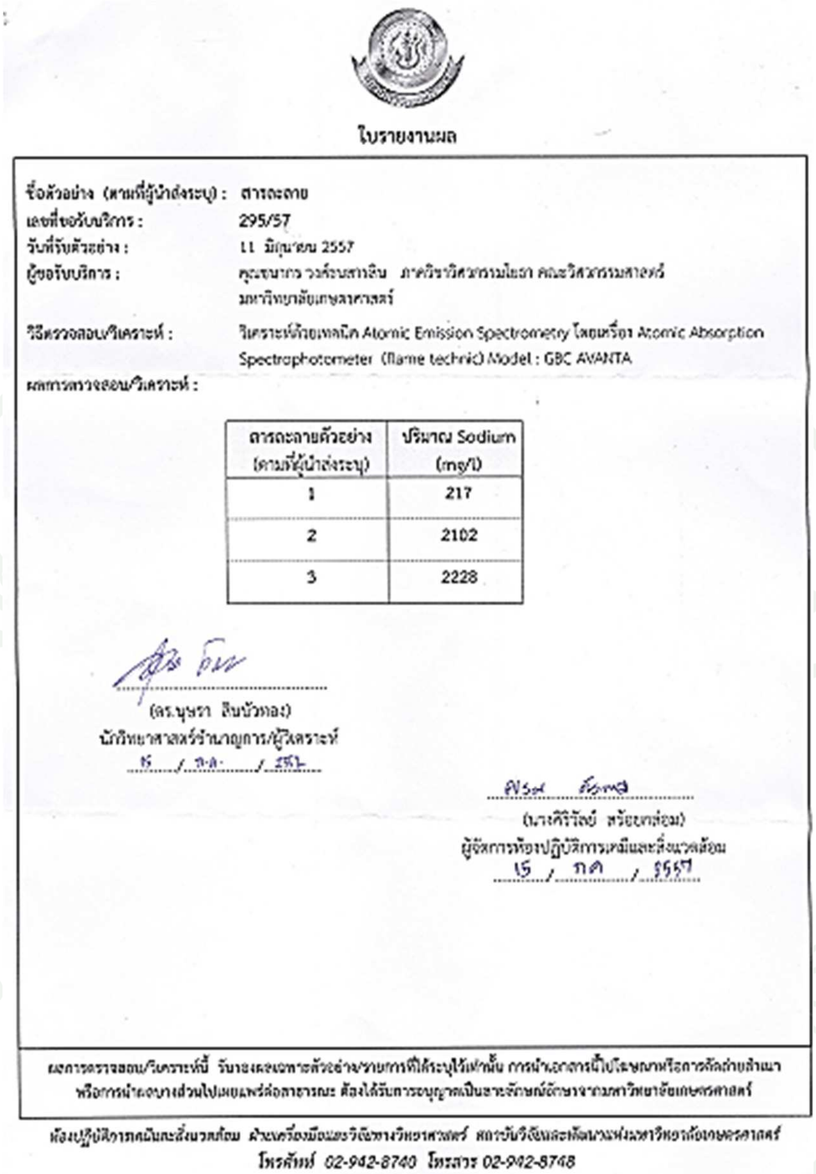
Peak no.	2theta	Flex Width	d-value	Intensity	I/Io

Sample No. 2 = Modified Zeolite: Pattern ของ peak ขึ้นครบทุก peak แต่ไม่ชัดเจน และ base line ไม่เรียบ แต่มี peak อื่น ขึ้นแทรกตำแหน่งระหว่าง peak no. 10 กับ 11 ซึ่งวัดค่า Crystallinity "A" ~ 79%
แสดงว่ามีสิ่งอื่นปะปนอยู่บ้าง แต่ไม่มากนัก เพราะ Pattern ของ peak ขึ้นครบ หรือว่าความเป็นผลึกของ Zeolite ยังคงมีรูปแบบเดิมเป็นส่วนใหญ่ และมีสิ่งอื่นปะปนบ้าง

July-14-2014 09:56:24 Page-1

ภาพผนวกที่ ข3 ผล XRD ของซีโอไลท์สังเคราะห์ และซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ใบรายงานผล

ชื่อตัวอย่าง (ตามที่ผู้นำส่งระบุ) : สารละลาย
เลขที่ขอรับบริการ : 295/57
วันที่รับตัวอย่าง : 11 มิถุนายน 2557
ผู้ขอรับบริการ : คุณธนากร วงศ์ธนสาลิน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิธีตรวจสอบ/วิเคราะห์ : วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Atomic Emission Spectrometry โดยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (flame technic) Model : GBC AVANTA
ผลการตรวจสอบ/วิเคราะห์ :

สารละลายตัวอย่าง (ตามที่ผู้นำส่งระบุ)	ปริมาณ Sodium (mg/l)
1	217
2	2102
3	2228

(ดร.บุษรา สินบัวทอง)
นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ/ผู้วิเคราะห์
15 / ก.ค. / 2557

(นางศิริรัตน์ สร้อยทรัพย์)
ผู้จัดการห้องปฏิบัติการเคมีและสิ่งแวดล้อม
15 / กค / 2557

ผลการตรวจสอบ/วิเคราะห์นี้ รับรองผลเฉพาะตัวอย่าง/รายการที่ได้ระบุไว้เท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปโฆษณาหรือการคัดถ่ายสำเนา หรือการนำผลบางส่วนไปเผยแพร่ต่อสาธารณะ ต้องได้รับการอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ห้องปฏิบัติการเคมีและสิ่งแวดล้อม ฝ่ายเครื่องมือและวิธีการทางวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
โทรศัพท์ 02-942-8740 โทรสาร 02-942-8748

ภาพผนวกที่ ข4 ผลการทดสอบ AAS

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบพฤติกรรมการควบคุมการขยายตัวของมอร์ต้าร์ กำลังรับแรงอัด
และความสามารถในการเทเบื้องต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค1 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ควบคุม (ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	2.785	1.820	0.000	2.032	0.000	1.771	0.000	1.874	0.000
1	2.785	1.827	0.003	2.028	-0.002	1.776	0.002	1.877	0.001
2	2.785	1.839	0.007	2.035	0.001	1.775	0.002	1.883	0.003
3	2.785	1.856	0.014	2.048	0.006	1.782	0.004	1.895	0.008
4	2.785	1.901	0.032	2.095	0.025	1.840	0.027	1.945	0.028
5	2.785	1.962	0.056	2.128	0.038	1.897	0.050	1.996	0.048
6	2.785	2.021	0.079	2.200	0.066	1.948	0.070	2.056	0.072
7	2.785	2.081	0.103	2.243	0.083	2.003	0.091	2.109	0.092
8	2.785	2.143	0.127	2.298	0.105	2.068	0.117	2.170	0.116
9	2.785	2.194	0.147	2.351	0.126	2.067	0.117	2.204	0.130
10	2.785	2.213	0.155	2.393	0.142	2.095	0.128	2.234	0.141
11	2.785	2.243	0.167	2.416	0.151	2.125	0.139	2.261	0.152
12	2.785	2.275	0.179	2.454	0.166	2.156	0.152	2.295	0.166
13	2.785	2.298	0.188	2.484	0.178	2.189	0.165	2.324	0.177
14	2.785	2.325	0.199	2.515	0.190	2.198	0.168	2.346	0.186
16	2.785	2.368	0.216	2.533	0.197	2.231	0.181	2.377	0.198
18	2.785	2.398	0.228	2.588	0.219	2.276	0.199	2.421	0.215
20	2.785	2.435	0.242	2.631	0.236	2.316	0.215	2.461	0.231
22	2.785	2.457	0.251	2.667	0.250	2.370	0.236	2.498	0.246
24	2.785	2.486	0.262	2.704	0.265	2.395	0.246	2.528	0.257
26	2.785	2.501	0.268	2.712	0.268	2.405	0.250	2.539	0.262
28	2.785	2.503	0.269	2.728	0.274	2.407	0.250	2.546	0.264
35	2.785	2.568	0.294	2.816	0.309	2.492	0.284	2.625	0.296

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค2 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ 0.5% (ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	2.780	1.974	0.000	1.815	0.000	1.674	0.000	1.821	0.000
1	2.780	1.981	0.003	1.822	0.003	1.673	0.000	1.825	0.002
2	2.780	1.988	0.006	1.828	0.005	1.677	0.001	1.831	0.004
3	2.780	1.995	0.008	1.855	0.016	1.707	0.013	1.852	0.012
4	2.780	2.011	0.015	1.888	0.029	1.731	0.022	1.877	0.022
5	2.780	2.042	0.027	1.922	0.042	1.761	0.034	1.908	0.034
6	2.780	2.069	0.037	1.958	0.056	1.807	0.052	1.945	0.049
7	2.780	2.119	0.057	2.017	0.080	1.906	0.091	2.014	0.076
8	2.780	2.163	0.074	2.066	0.099	1.916	0.095	2.048	0.090
9	2.780	2.212	0.094	2.125	0.122	1.951	0.109	2.096	0.108
10	2.780	2.260	0.113	2.154	0.133	2.006	0.131	2.140	0.126
11	2.780	2.295	0.126	2.196	0.150	2.026	0.139	2.172	0.138
12	2.780	2.318	0.135	2.228	0.163	2.040	0.144	2.195	0.147
13	2.780	2.358	0.151	2.265	0.177	2.078	0.159	2.234	0.162
14	2.780	2.395	0.166	2.280	0.183	2.115	0.174	2.263	0.174
16	2.780	2.424	0.177	2.346	0.209	2.175	0.197	2.315	0.194
18	2.780	2.497	0.206	2.358	0.214	2.147	0.186	2.334	0.202
20	2.780	2.526	0.217	2.401	0.231	2.226	0.217	2.384	0.222
22	2.780	2.536	0.221	2.418	0.237	2.238	0.222	2.397	0.227
24	2.780	2.573	0.236	2.450	0.250	2.266	0.233	2.430	0.240
26	2.780	2.578	0.238	2.457	0.253	2.284	0.240	2.440	0.244
28	2.780	2.580	0.239	2.472	0.259	2.297	0.245	2.450	0.248
35	2.780	2.632	0.259	2.530	0.281	2.368	0.273	2.510	0.271

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค3 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ 1.0% (ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	2.778	1.030	0.000	1.585	0.000	1.660	0.000	1.425	0.000
1	2.778	0.999	-0.012	1.553	-0.013	1.625	-0.014	1.392	-0.013
2	2.778	1.025	-0.002	1.580	-0.002	1.658	-0.001	1.421	-0.002
3	2.778	1.060	0.012	1.606	0.008	1.678	0.007	1.448	0.009
4	2.778	1.086	0.022	1.657	0.028	1.701	0.016	1.481	0.022
5	2.778	1.109	0.031	1.670	0.033	1.709	0.019	1.496	0.028
6	2.778	1.161	0.052	1.720	0.053	1.762	0.040	1.548	0.048
7	2.778	1.222	0.076	1.771	0.073	1.807	0.058	1.600	0.069
8	2.778	1.265	0.093	1.806	0.087	1.855	0.077	1.642	0.085
9	2.778	1.315	0.112	1.874	0.114	1.906	0.097	1.698	0.108
10	2.778	1.350	0.126	1.895	0.122	1.954	0.116	1.733	0.121
11	2.778	1.388	0.141	1.938	0.139	1.979	0.126	1.768	0.135
12	2.778	1.427	0.156	1.976	0.154	2.030	0.146	1.811	0.152
13	2.778	1.459	0.169	2.005	0.165	2.043	0.151	1.836	0.162
14	2.778	1.478	0.176	2.036	0.178	2.070	0.161	1.861	0.172
16	2.778	1.522	0.194	2.090	0.199	2.125	0.183	1.912	0.192
18	2.778	1.580	0.217	2.143	0.220	2.177	0.204	1.967	0.213
20	2.778	1.600	0.224	2.169	0.230	2.194	0.210	1.988	0.222
22	2.778	1.638	0.239	2.214	0.248	2.245	0.230	2.032	0.239
24	2.778	1.648	0.243	2.224	0.252	2.296	0.250	2.056	0.248
26	2.778	1.666	0.250	2.238	0.257	2.304	0.254	2.069	0.254
28	2.778	1.661	0.248	2.258	0.265	2.311	0.256	2.077	0.257
35	2.778	1.737	0.278	2.317	0.288	2.369	0.279	2.141	0.282

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค4 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ 1.5% (ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	2.778	2.263	0.000	1.718	0.000	2.367	0.000	2.116	0.000
1	2.778	2.248	-0.006	1.714	-0.002	2.377	0.004	2.113	-0.001
2	2.778	2.275	0.005	1.729	0.004	2.374	0.003	2.126	0.004
3	2.778	2.287	0.009	1.736	0.007	2.382	0.006	2.135	0.007
4	2.778	2.286	0.009	1.737	0.007	2.419	0.020	2.147	0.012
5	2.778	2.298	0.014	1.754	0.014	2.462	0.037	2.171	0.022
6	2.778	2.343	0.031	1.780	0.024	2.517	0.059	2.213	0.038
7	2.778	2.408	0.057	1.836	0.046	2.571	0.080	2.272	0.061
8	2.778	2.449	0.073	1.866	0.058	2.662	0.116	2.326	0.083
9	2.778	2.513	0.098	1.923	0.081	2.668	0.119	2.368	0.099
10	2.778	2.545	0.111	1.986	0.106	2.697	0.130	2.409	0.115
11	2.778	2.571	0.121	2.013	0.116	2.757	0.154	2.447	0.130
12	2.778	2.605	0.135	2.024	0.120	2.786	0.165	2.472	0.140
13	2.778	2.657	0.155	2.056	0.133	2.812	0.175	2.508	0.154
14	2.778	2.668	0.159	2.065	0.137	2.833	0.183	2.522	0.160
16	2.778	2.712	0.177	2.142	0.167	2.884	0.204	2.579	0.182
18	2.778	2.742	0.189	2.171	0.178	2.898	0.209	2.604	0.192
20	2.778	2.802	0.212	2.199	0.189	2.966	0.236	2.656	0.212
22	2.778	2.853	0.232	2.232	0.202	2.978	0.241	2.688	0.225
24	2.778	2.890	0.247	2.255	0.211	3.025	0.259	2.723	0.239
26	2.778	2.899	0.250	2.276	0.220	3.048	0.268	2.741	0.246
28	2.778	2.909	0.254	2.275	0.219	3.055	0.271	2.746	0.248
35	2.778	3.006	0.293	2.358	0.252	3.124	0.298	2.829	0.281

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค5 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ 2.5% (ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	2.785	1.780	0.000	2.231	0.000	2.615	0.000	2.209	0.000
1	2.785	1.777	-0.001	2.225	-0.002	2.626	0.004	2.209	0.000
2	2.785	1.757	-0.009	2.243	0.005	2.632	0.007	2.211	0.001
3	2.785	1.781	0.000	2.264	0.013	2.649	0.013	2.231	0.009
4	2.785	1.839	0.023	2.335	0.041	2.711	0.038	2.295	0.034
5	2.785	1.895	0.045	2.379	0.058	2.756	0.056	2.343	0.053
6	2.785	1.953	0.068	2.440	0.082	2.813	0.078	2.402	0.076
7	2.785	2.027	0.097	2.484	0.100	2.871	0.101	2.461	0.099
8	2.785	2.072	0.115	2.525	0.116	2.918	0.119	2.505	0.117
9	2.785	2.103	0.127	2.573	0.135	2.965	0.138	2.547	0.133
10	2.785	2.132	0.139	2.600	0.145	2.988	0.147	2.573	0.144
11	2.785	2.168	0.153	2.631	0.157	3.012	0.156	2.604	0.156
12	2.785	2.192	0.162	2.660	0.169	3.042	0.168	2.631	0.166
13	2.785	2.210	0.169	2.667	0.172	3.053	0.172	2.643	0.171
14	2.785	2.226	0.176	2.690	0.181	3.075	0.181	2.664	0.179
15	2.785	2.235	0.179	2.701	0.185	3.092	0.188	2.676	0.184
16	2.785	2.263	0.190	2.710	0.189	3.111	0.195	2.695	0.191
18	2.785	2.285	0.199	2.730	0.196	3.115	0.197	2.710	0.197
20	2.785	2.311	0.209	2.770	0.212	3.157	0.213	2.746	0.212
22	2.785	2.340	0.220	2.799	0.224	3.184	0.224	2.774	0.223
24	2.785	2.369	0.232	2.830	0.236	3.213	0.235	2.804	0.234
26	2.785	2.380	0.236	2.845	0.242	3.237	0.245	2.821	0.241
28	2.785	2.402	0.245	2.856	0.246	3.250	0.250	2.836	0.247
35	2.785	2.471	0.272	2.904	0.265	3.299	0.269	2.891	0.269

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค6 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ 5.0% (ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	2.785	1.797	0.000	0.280	0.000	1.558	0.000	1.212	0.000
1	2.785	1.707	-0.035	0.306	0.010	1.565	0.003	1.193	-0.007
3	2.785	1.858	0.024	0.398	0.046	1.611	0.021	1.289	0.030
4	2.785	1.87	0.029	0.435	0.061	1.673	0.045	1.326	0.045
5	2.785	1.937	0.055	0.465	0.073	1.724	0.065	1.375	0.064
6	2.785	2.015	0.086	0.543	0.104	1.811	0.100	1.456	0.096
7	2.785	2.053	0.101	0.612	0.131	1.874	0.124	1.513	0.119
8	2.785	2.086	0.114	0.651	0.146	1.897	0.133	1.545	0.131
9	2.785	2.111	0.124	0.687	0.160	1.946	0.153	1.581	0.146
10	2.785	2.150	0.139	0.725	0.175	1.970	0.162	1.615	0.159
11	2.785	2.156	0.141	0.736	0.180	1.994	0.172	1.629	0.164
12	2.785	2.183	0.152	0.772	0.194	2.021	0.182	1.659	0.176
13	2.785	2.214	0.164	0.784	0.198	2.048	0.193	1.682	0.185
14	2.785	2.219	0.166	0.817	0.211	2.064	0.199	1.700	0.192
15	2.785	2.218	0.166	0.824	0.214	2.075	0.204	1.706	0.194
16	2.785	2.213	0.164	0.838	0.220	2.091	0.210	1.714	0.198
17	2.785	2.231	0.171	0.85	0.224	2.113	0.219	1.731	0.205
18	2.785	2.25	0.178	0.874	0.234	2.123	0.222	1.749	0.212
20	2.785	2.265	0.184	0.886	0.239	2.140	0.229	1.764	0.217
22	2.785	2.289	0.194	0.909	0.248	2.168	0.240	1.789	0.227
24	2.785	2.300	0.198	0.936	0.258	2.191	0.249	1.809	0.235
26	2.785	2.318	0.205	0.956	0.266	2.230	0.265	1.835	0.245
28	2.785	2.345	0.216	0.974	0.273	2.246	0.271	1.855	0.253
35	2.785	2.363	0.223	0.994	0.281	2.287	0.287	1.881	0.264

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค7 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ 7.5% (ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	2.785	1.665	0.000	1.547	0.000	1.581	0.000	1.598	0.000
1	2.785	1.672	0.003	1.548	0.000	1.594	0.005	1.605	0.003
2	2.785	1.619	-0.018	1.578	0.012	1.637	0.022	1.611	0.005
3	2.785	1.790	0.049	1.644	0.038	1.700	0.047	1.711	0.045
4	2.785	1.989	0.128	1.843	0.117	1.902	0.126	1.911	0.123
5	2.785	1.998	0.131	1.919	0.146	2.073	0.194	1.997	0.157
6	2.785	2.156	0.193	1.993	0.176	2.071	0.193	2.073	0.187
7	2.785	2.234	0.224	2.056	0.200	2.120	0.212	2.137	0.212
8	2.785	2.249	0.230	2.089	0.213	2.167	0.231	2.168	0.225
9	2.785	2.288	0.245	2.117	0.224	2.230	0.256	2.212	0.242
10	2.785	2.306	0.252	2.138	0.233	2.210	0.248	2.218	0.244
11	2.785	2.327	0.261	2.154	0.239	2.221	0.252	2.234	0.251
12	2.785	2.340	0.266	2.173	0.246	2.243	0.261	2.252	0.258
13	2.785	2.355	0.272	2.187	0.252	2.254	0.265	2.265	0.263
14	2.785	2.385	0.283	2.200	0.257	2.257	0.266	2.281	0.269
15	2.785	2.383	0.283	2.208	0.260	2.278	0.274	2.290	0.272
16	2.785	2.406	0.292	2.219	0.265	2.291	0.280	2.305	0.279
18	2.785	2.415	0.295	2.225	0.267	2.289	0.279	2.310	0.280
20	2.785	2.425	0.299	2.253	0.278	2.318	0.290	2.332	0.289
22	2.785	2.465	0.315	2.296	0.295	2.357	0.306	2.373	0.305
24	2.785	2.491	0.325	2.311	0.301	2.387	0.317	2.396	0.314
26	2.785	2.501	0.329	2.328	0.307	2.403	0.324	2.411	0.320
28	2.785	2.502	0.330	2.323	0.306	2.400	0.322	2.408	0.319
35	2.785	2.548	0.348	2.353	0.317	2.422	0.331	2.441	0.332

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค8 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ 10% (ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	2.785	0.740	0.000	0.610	0.000	0.087	0.000	0.479	0.000
1	2.785	0.750	0.004	0.613	0.001	0.081	-0.002	0.481	0.001
3	2.785	0.979	0.094	0.725	0.045	0.088	0.000	0.597	0.047
4	2.785	1.084	0.135	0.939	0.130	0.284	0.078	0.769	0.114
5	2.785	1.190	0.177	1.017	0.160	0.486	0.157	0.898	0.165
6	2.785	1.323	0.230	1.156	0.215	0.616	0.208	1.032	0.218
7	2.785	1.347	0.239	1.193	0.230	0.705	0.243	1.082	0.237
8	2.785	1.402	0.261	1.238	0.247	0.732	0.254	1.124	0.254
9	2.785	1.425	0.270	1.279	0.263	0.678	0.233	1.127	0.255
10	2.785	1.448	0.279	1.286	0.266	0.683	0.235	1.139	0.260
11	2.785	1.475	0.289	1.311	0.276	0.710	0.245	1.165	0.270
12	2.785	1.489	0.295	1.324	0.281	0.724	0.251	1.179	0.276
13	2.785	1.514	0.305	1.355	0.293	0.750	0.261	1.206	0.286
14	2.785	1.519	0.307	1.362	0.296	0.760	0.265	1.214	0.289
15	2.785	1.540	0.315	1.383	0.304	0.785	0.275	1.236	0.298
16	2.785	1.548	0.318	1.397	0.310	0.794	0.278	1.246	0.302
17	2.785	1.530	0.311	1.398	0.310	0.800	0.281	1.243	0.301
18	2.785	1.553	0.320	1.415	0.317	0.821	0.289	1.263	0.309
20	2.785	1.547	0.318	1.436	0.325	0.836	0.295	1.273	0.313
22	2.785	1.570	0.327	1.472	0.339	0.897	0.319	1.313	0.328
24	2.785	1.584	0.332	1.498	0.350	0.898	0.319	1.327	0.334
26	2.785	1.640	0.354	1.528	0.361	0.928	0.331	1.365	0.349
28	2.785	1.670	0.366	1.553	0.371	0.948	0.339	1.390	0.359
35	2.785	1.706	0.380	1.576	0.380	1.056	0.3815	1.446	0.381

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค9 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 0.5% (ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	2.780	1.387	0.000	1.134	0.000	1.127	0.000	1.216	0.000
1	2.780	1.427	0.016	1.127	-0.003	1.125	-0.001	1.226	0.004
2	2.780	1.420	0.013	1.120	-0.006	1.131	0.002	1.224	0.003
3	2.780	1.440	0.021	1.121	-0.005	1.130	0.001	1.230	0.006
4	2.780	1.439	0.020	1.171	0.015	1.169	0.017	1.260	0.017
5	2.780	1.471	0.033	1.189	0.022	1.191	0.025	1.284	0.027
6	2.780	1.498	0.044	1.216	0.032	1.223	0.038	1.312	0.038
7	2.780	1.562	0.069	1.268	0.053	1.291	0.065	1.374	0.062
8	2.780	1.604	0.085	1.314	0.071	1.318	0.075	1.412	0.077
9	2.780	1.647	0.102	1.370	0.093	1.376	0.098	1.464	0.098
10	2.780	1.700	0.123	1.402	0.106	1.422	0.116	1.508	0.115
11	2.780	1.737	0.138	1.451	0.125	1.452	0.128	1.547	0.130
12	2.780	1.768	0.150	1.488	0.139	1.471	0.135	1.576	0.142
13	2.780	1.805	0.165	1.508	0.147	1.508	0.150	1.607	0.154
14	2.780	1.823	0.172	1.550	0.164	1.541	0.163	1.638	0.166
16	2.780	1.897	0.201	1.595	0.181	1.622	0.195	1.705	0.192
18	2.780	1.917	0.209	1.648	0.202	1.649	0.206	1.738	0.206
20	2.780	1.976	0.232	1.688	0.218	1.722	0.234	1.795	0.228
22	2.780	2.006	0.244	1.763	0.248	1.720	0.233	1.830	0.242
24	2.780	2.043	0.258	1.765	0.248	1.753	0.246	1.854	0.251
26	2.780	2.054	0.263	1.772	0.251	1.774	0.255	1.867	0.256
28	2.780	2.073	0.270	1.795	0.260	1.794	0.263	1.887	0.264
35	2.780	2.145	0.298	1.840	0.278	1.845	0.283	1.943	0.286

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค10 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 1.0% (ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	2.778	0.683	0.000	1.444	0.000	0.632	0.000	0.920	0.000
1	2.778	0.663	-0.008	1.403	-0.016	0.630	-0.001	0.899	-0.008
2	2.778	0.677	-0.002	1.457	0.005	0.645	0.005	0.926	0.003
3	2.778	0.682	0.000	1.475	0.012	0.649	0.007	0.935	0.006
4	2.778	0.691	0.003	1.487	0.017	0.660	0.011	0.946	0.010
5	2.778	0.703	0.008	1.507	0.025	0.670	0.015	0.960	0.016
6	2.778	0.718	0.014	1.541	0.038	0.711	0.031	0.990	0.028
7	2.778	0.785	0.040	1.593	0.059	0.721	0.035	1.033	0.045
8	2.778	0.811	0.050	1.644	0.079	0.788	0.061	1.081	0.064
9	2.778	0.883	0.079	1.692	0.098	0.844	0.083	1.140	0.087
10	2.778	0.902	0.086	1.740	0.117	0.901	0.106	1.181	0.103
11	2.778	0.954	0.107	1.756	0.123	0.931	0.118	1.214	0.116
12	2.778	0.961	0.109	1.806	0.143	0.950	0.125	1.239	0.126
13	2.778	1.016	0.131	1.840	0.156	0.975	0.135	1.277	0.141
14	2.778	1.018	0.132	1.867	0.167	0.990	0.141	1.292	0.146
16	2.778	1.053	0.146	1.903	0.181	1.070	0.172	1.342	0.166
18	2.778	1.164	0.189	1.970	0.207	1.102	0.185	1.412	0.194
20	2.778	1.195	0.202	2.006	0.221	1.126	0.194	1.442	0.206
22	2.778	1.198	0.203	2.020	0.227	1.173	0.213	1.464	0.214
24	2.778	1.201	0.204	2.030	0.231	1.168	0.211	1.466	0.215
26	2.778	1.198	0.203	2.041	0.235	1.180	0.216	1.473	0.218
28	2.778	1.191	0.200	2.051	0.239	1.184	0.217	1.475	0.219
35	2.778	1.237	0.218	2.104	0.260	1.207	0.226	1.516	0.235

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค11 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 1.5% (ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	2.778	1.725	0.000	1.160	0.000	1.727	0.000	1.537	0.000
1	2.778	1.720	-0.002	1.153	-0.003	1.717	-0.004	1.530	-0.003
2	2.778	1.757	0.013	1.180	0.008	1.740	0.005	1.559	0.009
3	2.778	1.763	0.015	1.191	0.012	1.735	0.003	1.563	0.010
4	2.778	1.786	0.024	1.211	0.020	1.743	0.006	1.580	0.017
5	2.778	1.814	0.035	1.213	0.021	1.756	0.011	1.594	0.022
6	2.778	1.863	0.054	1.263	0.041	1.806	0.031	1.644	0.042
7	2.778	1.934	0.082	1.327	0.066	1.870	0.056	1.710	0.068
8	2.778	1.988	0.104	1.389	0.090	1.921	0.076	1.766	0.090
9	2.778	2.038	0.123	1.444	0.112	1.964	0.093	1.815	0.109
10	2.778	2.073	0.137	1.496	0.132	1.997	0.106	1.855	0.125
11	2.778	2.100	0.148	1.510	0.138	2.058	0.130	1.889	0.139
12	2.778	2.167	0.174	1.545	0.152	2.044	0.125	1.919	0.150
13	2.778	2.172	0.176	1.560	0.157	2.120	0.155	1.951	0.163
14	2.778	2.262	0.211	1.586	0.168	2.127	0.157	1.992	0.179
16	2.778	2.250	0.207	1.622	0.182	2.176	0.177	2.016	0.188
18	2.778	2.327	0.237	1.683	0.206	2.229	0.198	2.080	0.214
20	2.778	2.334	0.240	1.713	0.218	2.275	0.216	2.107	0.224
22	2.778	2.387	0.261	1.762	0.237	2.329	0.237	2.159	0.245
24	2.778	2.407	0.269	1.782	0.245	2.348	0.244	2.179	0.253
26	2.778	2.416	0.272	1.806	0.254	2.347	0.244	2.190	0.257
28	2.778	2.425	0.276	1.802	0.253	2.349	0.245	2.192	0.258
35	2.778	2.509	0.309	1.884	0.285	2.432	0.278	2.275	0.290

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค12 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 2.5% (ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	5.420	4.852	0.000	4.912	0.000	4.814	0.000	4.859	0.000
1	5.420	4.860	0.003	4.912	0.000	4.828	0.006	4.867	0.003
2	5.420	4.860	0.003	4.920	0.003	4.822	0.003	4.867	0.003
3	5.420	4.868	0.006	4.918	0.002	4. 22	0.003	4.869	0.004
4	5.420	4.892	0.016	4.958	0.018	4.868	0.021	4.906	0.018
5	5.420	4.927	0.030	5.014	0.040	4.894	0.031	4.945	0.034
6	5.420	4.937	0.033	5.053	0.056	4.993	0.070	4.994	0.053
7	5.420	5.042	0.075	5.110	0.078	4.986	0.068	5.046	0.073
9	5.420	5.124	0.107	5.196	0.112	5.086	0.107	5.135	0.109
10	5.420	5.163	0.122	5.238	0.128	5.128	0.124	5.176	0.125
11	5.420	5.192	0.134	5.276	0.143	5.156	0.135	5.208	0.137
12	5.420	5.236	0.151	5.300	0.153	5.182	0.145	5.239	0.150
13	5.420	5.248	0.156	5.354	0.174	5.176	0.143	5.259	0.157
14	5.420	5.326	0.187	5.372	0.181	5.252	0.172	5.317	0.180
16	5.420	5.350	0.196	5.428	0.203	5.312	0.196	5.363	0.198
18	5.420	5.394	0.213	5.480	0.224	5.352	0.212	5.409	0.216
20	5.420	5.434	0.229	5.522	0.240	5.392	0.228	5.449	0.232
22	5.420	5.484	0.249	5.582	0.264	5.452	0.251	5.506	0.255
24	5.420	5.502	0.256	5.612	0.276	5.476	0.261	5.530	0.264
28	5.420	5.524	0.265	5.666	0.297	5.554	0.291	5.581	0.284
35	5.420	5.660	0.318	5.624	0.280	5.570	0.298	5.618	0.299

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค13 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติแทนที่ 10% (ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	3.677	3.149	0.000	2.941	0.000	3.520	0.000	3.203	0.000
2	3.677	3.142	-0.003	2.940	0.000	3.510	-0.004	3.197	-0.002
3	3.677	3.149	0.000	2.953	0.005	3.521	0.000	3.208	0.002
4	3.677	3.149	0.000	2.948	0.003	3.531	0.004	3.209	0.002
5	3.677	3.154	0.002	2.956	0.006	3.531	0.004	3.214	0.004
6	3.677	3.151	0.001	2.962	0.008	3.535	0.006	3.216	0.005
7	3.677	3.169	0.008	2.975	0.013	3.542	0.009	3.229	0.010
8	3.677	3.185	0.014	3.005	0.025	3.575	0.022	3.255	0.020
10	3.677	3.217	0.027	3.036	0.037	3.597	0.030	3.283	0.031
12	3.677	3.246	0.038	3.061	0.047	3.602	0.032	3.303	0.039
13	3.677	3.256	0.042	3.073	0.052	3.609	0.035	3.313	0.043
14	3.677	3.261	0.044	3.072	0.052	3.613	0.037	3.315	0.044
16	3.677	3.264	0.045	3.092	0.059	3.635	0.045	3.330	0.050
19	3.677	3.294	0.057	3.129	0.074	3.658	0.054	3.360	0.062
24	3.677	3.331	0.072	3.142	0.079	3.712	0.076	3.395	0.075
26	3.677	3.323	0.069	3.121	0.071	3.697	0.070	3.380	0.070
28	3.677	3.334	0.073	3.124	0.072	3.710	0.075	3.389	0.073

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค14 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติแทนที่ 20% (ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	3.677	3.131	0.000	2.852	0.000	3.052	0.000	3.012	0.000
2	3.677	3.124	-0.003	2.846	-0.002	3.064	0.005	3.011	0.000
3	3.677	3.133	0.001	2.846	-0.002	3.066	0.006	3.015	0.001
4	3.677	3.125	-0.002	2.846	-0.002	3.057	0.002	3.009	-0.001
5	3.677	3.128	-0.001	2.850	-0.001	3.061	0.004	3.013	0.001
6	3.677	3.134	0.001	2.849	-0.001	3.067	0.006	3.017	0.002
7	3.677	3.138	0.003	2.850	-0.001	3.070	0.007	3.019	0.003
8	3.677	3.137	0.002	2.847	-0.002	3.074	0.009	3.019	0.003
10	3.677	3.123	-0.003	2.834	-0.007	3.070	0.007	3.009	-0.001
12	3.677	3.132	0.000	2.825	-0.011	3.075	0.009	3.011	0.000
13	3.677	3.134	0.001	2.822	-0.012	3.077	0.010	3.011	0.000
14	3.677	3.122	-0.004	2.817	-0.014	3.072	0.008	3.004	-0.003
16	3.677	3.129	-0.001	2.817	-0.014	3.088	0.014	3.011	0.000
19	3.677	3.153	0.009	2.830	-0.009	3.105	0.021	3.029	0.007
24	3.677	3.178	0.019	2.863	0.004	3.129	0.030	3.057	0.018
26	3.677	3.187	0.022	2.843	-0.004	3.132	0.031	3.054	0.017
28	3.667	3.189	0.023	2.849	-0.001	3.133	0.032	3.057	0.018

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค15 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ควบคุม (Modified ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	2.771	1.392	0.000	2.433	0.000	1.836	0.000	1.887	0.000
1	2.771	1.592	0.079	2.627	0.076	2.008	0.068	2.076	0.074
3	2.771	1.884	0.194	2.910	0.188	2.391	0.219	2.395	0.200
4	2.771	2.357	0.380	2.986	0.218	2.942	0.435	2.762	0.344
5	2.771	2.399	0.396	3.023	0.232	2.978	0.450	2.800	0.359
6	2.771	2.399	0.396	3.036	0.237	2.989	0.454	2.808	0.363
7	2.771	2.399	0.396	3.070	0.251	3.054	0.480	2.841	0.376
8	2.771	2.437	0.411	3.106	0.265	3.061	0.482	2.868	0.386
9	2.771	2.433	0.410	3.099	0.262	3.078	0.489	2.870	0.387
10	2.771	2.448	0.416	3.116	0.269	3.086	0.492	2.883	0.392
11	2.771	2.461	0.421	3.124	0.272	3.126	0.508	2.904	0.400
12	2.771	2.473	0.426	3.130	0.274	3.151	0.518	2.918	0.406
14	2.771	2.467	0.423	3.124	0.272	3.108	0.501	2.900	0.399
16	2.771	2.463	0.422	3.131	0.275	3.120	0.506	2.905	0.401
19	2.771	2.479	0.428	3.165	0.288	3.126	0.508	2.923	0.408
21	2.771	2.516	0.443	3.178	0.293	3.135	0.511	2.943	0.416
23	2.771	2.506	0.439	3.166	0.289	3.119	0.505	2.930	0.411
25	2.771	2.518	0.443	3.176	0.293	3.121	0.506	2.938	0.414
28	2.771	2.520	0.444	3.189	0.298	3.134	0.511	2.948	0.418
35	2.771	2.532	0.449	3.195	0.300	3.135	0.511	2.954	0.420

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค16 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 0.5% (Modified ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	2.771	1.427	0.000	2.387	0.000	2.011	0.000	1.942	0.000
1	2.771	1.608	0.071	2.587	0.079	2.203	0.076	2.133	0.075
3	2.771	1.912	0.191	2.892	0.199	2.525	0.202	2.443	0.197
4	2.771	1.994	0.223	2.977	0.232	2.598	0.231	2.523	0.229
5	2.771	2.034	0.239	3.016	0.248	2.638	0.247	2.563	0.244
6	2.771	2.060	0.249	3.048	0.260	2.670	0.259	2.593	0.256
7	2.771	2.081	0.257	3.070	0.269	2.708	0.274	2.620	0.267
8	2.771	2.116	0.271	3.140	0.296	2.726	0.281	2.661	0.283
9	2.771	2.130	0.277	3.158	0.304	2.735	0.285	2.674	0.288
10	2.771	2.140	0.281	3.173	0.309	2.741	0.287	2.685	0.293
11	2.771	2.143	0.282	3.193	0.317	2.740	0.287	2.692	0.295
12	2.771	2.140	0.281	3.202	0.321	2.741	0.287	2.694	0.296
14	2.771	2.147	0.283	3.208	0.323	2.742	0.288	2.699	0.298
16	2.771	2.144	0.282	3.211	0.324	2.749	0.291	2.701	0.299
19	2.771	2.155	0.287	3.229	0.331	2.764	0.296	2.716	0.305
21	2.771	2.158	0.288	3.217	0.327	2.791	0.307	2.722	0.307
23	2.771	2.147	0.283	3.258	0.343	2.781	0.303	2.729	0.310
25	2.771	2.152	0.285	3.260	0.344	2.762	0.296	2.725	0.308
28	2.771	2.150	0.285	3.244	0.337	2.794	0.308	2.729	0.310
35	2.771	2.157	0.287	3.245	0.338	2.803	0.312	2.735	0.312

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค17 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 1.0% (Modified ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	2.771	1.446	0.000	2.071	0.000	2.201	0.000	1.906	0.000
1	2.771	1.667	0.087	2.298	0.089	2.397	0.077	2.121	0.085
3	2.771	1.924	0.188	2.602	0.209	2.689	0.192	2.405	0.196
4	2.771	1.981	0.211	2.668	0.235	2.757	0.219	2.469	0.222
5	2.771	1.996	0.217	2.704	0.249	2.766	0.222	2.489	0.229
6	2.771	2.006	0.220	2.739	0.263	2.790	0.232	2.512	0.238
7	2.771	2.043	0.235	2.768	0.274	2.799	0.235	2.537	0.248
8	2.771	2.041	0.234	2.788	0.282	2.820	0.244	2.550	0.253
9	2.771	2.075	0.248	2.788	0.282	2.818	0.243	2.560	0.258
10	2.771	2.048	0.237	2.788	0.282	2.820	0.244	2.552	0.254
11	2.771	2.045	0.236	2.798	0.286	2.822	0.244	2.555	0.256
12	2.771	2.040	0.234	2.804	0.289	2.843	0.253	2.562	0.258
14	2.771	2.048	0.237	2.792	0.284	2.834	0.249	2.558	0.257
16	2.771	2.033	0.231	2.807	0.290	2.829	0.247	2.556	0.256
19	2.771	2.054	0.239	2.821	0.295	2.839	0.251	2.571	0.262
21	2.771	2.061	0.242	2.826	0.297	2.850	0.256	2.579	0.265
23	2.771	2.065	0.244	2.820	0.295	2.843	0.253	2.576	0.264
25	2.771	2.072	0.246	2.824	0.296	2.851	0.256	2.582	0.266
28	2.771	2.068	0.245	2.832	0.300	2.858	0.259	2.586	0.268
35	2.771	2.080	0.250	2.848	0.306	2.876	0.266	2.601	0.274

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค18 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 1.5% (Modified ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	2.771	1.288	0.000	3.270	0.000	1.260	0.000	1.939	0.000
1	2.771	1.461	0.068	3.273	0.001	1.657	0.156	2.130	0.075
3	2.771	1.629	0.134	3.672	0.158	1.846	0.231	2.382	0.174
4	2.771	1.664	0.148	3.744	0.187	1.887	0.247	2.432	0.194
5	2.771	1.719	0.170	3.777	0.200	1.925	0.262	2.474	0.210
6	2.771	1.753	0.183	3.793	0.206	1.933	0.265	2.493	0.218
7	2.771	1.765	0.188	3.829	0.220	1.946	0.270	2.513	0.226
8	2.771	1.789	0.197	3.858	0.231	1.967	0.278	2.538	0.236
9	2.771	1.800	0.202	3.860	0.232	1.978	0.283	2.546	0.239
10	2.771	1.811	0.206	3.873	0.237	1.969	0.279	2.551	0.241
11	2.771	1.807	0.204	3.871	0.237	1.974	0.281	2.551	0.241
12	2.771	1.808	0.205	3.875	0.238	1.999	0.291	2.561	0.245
14	2.771	1.793	0.199	3.882	0.241	1.952	0.272	2.542	0.237
16	2.771	1.775	0.192	3.875	0.238	1.988	0.287	2.546	0.239
19	2.771	1.801	0.202	3.884	0.242	2.014	0.297	2.566	0.247
21	2.771	1.809	0.205	3.873	0.237	2.038	0.306	2.573	0.250
23	2.771	1.800	0.202	3.882	0.241	1.987	0.286	2.556	0.243
25	2.771	1.800	0.202	3.884	0.242	2.018	0.298	2.567	0.247
28	2.771	1.806	0.204	3.887	0.243	2.018	0.298	2.570	0.248
35	2.771	1.820	0.209	3.888	0.243	2.014	0.297	2.574	0.250

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค19 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 2.5% (Modified ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	5.420	4.352	0.000	5.120	0.000	4.577	0.000	0.000	0.000
1	5.420	4.540	0.074	5.302	0.072	4.760	0.072	4.867	0.073
2	5.420	4.718	0.144	5.502	0.150	4.944	0.144	5.055	0.146
3	5.420	4.840	0.192	5.630	0.201	5.044	0.184	5.171	0.192
4	5.420	4.926	0.226	5.702	0.229	5.148	0.225	5.259	0.227
5	5.420	4.984	0.249	5.768	0.255	5.294	0.282	5.349	0.262
6	5.420	5.050	0.275	5.849	0.287	5.256	0.267	5.385	0.276
7	5.420	5.093	0.292	5.873	0.296	5.285	0.279	5.417	0.289
8	5.420	5.102	0.295	5.880	0.299	5.298	0.284	5.427	0.293
10	5.420	5.140	0.310	5.952	0.328	5.336	0.299	5.476	0.312
11	5.420	5.168	0.321	5.974	0.336	5.368	0.311	5.503	0.323
12	5.420	5.160	0.318	5.966	0.333	5.360	0.308	5.495	0.320
13	5.420	5.180	0.326	5.982	0.339	5.374	0.314	5.512	0.326
14	5.420	5.200	0.334	5.994	0.344	5.386	0.319	5.527	0.332
15	5.420	5.190	0.330	5.996	0.345	5.380	0.316	5.522	0.330
17	5.420	5.202	0.335	6.008	0.350	5.376	0.315	5.529	0.333
19	5.420	5.200	0.334	6.006	0.349	5.386	0.319	5.531	0.334
21	5.420	5.204	0.335	6.014	0.352	5.386	0.319	5.535	0.335
23	5.420	5.230	0.346	6.036	0.361	5.402	0.325	5.556	0.344
25	5.420	5.224	0.343	6.020	0.354	5.396	0.322	5.547	0.340
28	5.420	5.218	0.341	6.012	0.351	5.386	0.319	5.539	0.337
35	5.420	5.216	0.340	6.010	0.350	5.380	0.316	5.535	0.336

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค20 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ 35% (Modified ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	av	%
0	3.678	2.878	0.000	3.464	0.000	3.171	0.000
2	3.678	3.074	0.077	3.656	0.076	3.365	0.076
3	3.678	3.080	0.080	3.689	0.089	3.385	0.084
4	3.678	3.115	0.093	3.732	0.106	3.424	0.099
5	3.678	3.135	0.101	3.748	0.112	3.442	0.106
6	3.678	3.163	0.112	3.756	0.115	3.460	0.114
7	3.678	3.195	0.125	3.774	0.122	3.485	0.123
10	3.678	3.256	0.149	3.851	0.152	3.554	0.151
11	3.678	3.278	0.157	3.842	0.149	3.560	0.153
12	3.678	3.274	0.156	3.857	0.155	3.566	0.155
13	3.678	3.286	0.161	3.843	0.149	3.565	0.155
14	3.678	3.291	0.163	3.849	0.152	3.570	0.157
17	3.678	3.298	0.165	3.864	0.157	3.581	0.161
19	3.678	3.312	0.171	3.890	0.168	3.601	0.169
21	3.678	3.326	0.176	3.878	0.163	3.602	0.170
24	3.678	3.337	0.181	3.900	0.172	3.619	0.176
27	3.678	3.341	0.182	3.900	0.172	3.621	0.177
29	3.678	3.345	0.184	3.916	0.178	3.631	0.181
35	3.678	3.362	0.191	3.927	0.182	3.645	0.186

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค21 การขยายตัวของชุดมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ 50% (Modified ASTM C1260)

	ref	1	%	2	%	3	%	av	%
0	3.678	2.925	0.000	2.775	0.000	2.450	0.000	2.717	0.000
2	3.678	3.094	0.067	2.943	0.066	2.612	0.064	2.883	0.065
3	3.678	3.115	0.075	2.964	0.074	2.619	0.067	2.899	0.072
4	3.678	3.135	0.083	2.985	0.083	2.627	0.070	2.916	0.078
5	3.678	3.144	0.086	2.997	0.087	2.635	0.073	2.925	0.082
6	3.678	3.145	0.087	3.004	0.090	2.641	0.075	2.930	0.084
7	3.678	3.160	0.093	3.005	0.091	2.647	0.078	2.937	0.087
10	3.678	3.179	0.100	3.053	0.109	2.679	0.090	2.970	0.100
11	3.678	3.184	0.102	3.058	0.111	2.694	0.096	2.979	0.103
12	3.678	3.186	0.103	3.060	0.112	2.704	0.100	2.983	0.105
13	3.678	3.187	0.103	3.066	0.115	2.703	0.100	2.985	0.106
14	3.678	3.188	0.104	3.066	0.115	2.706	0.101	2.987	0.106
17	3.678	3.209	0.112	3.085	0.122	2.721	0.107	3.005	0.114
19	3.678	3.217	0.115	3.101	0.128	2.730	0.110	3.016	0.118
21	3.678	3.216	0.115	3.109	0.131	2.734	0.112	3.020	0.119
24	3.678	3.238	0.123	3.129	0.139	2.748	0.117	3.038	0.127
27	3.678	3.235	0.122	3.123	0.137	2.751	0.119	3.036	0.126
29	3.678	3.236	0.122	3.133	0.141	2.752	0.119	3.040	0.127
35	3.678	3.236	0.122	3.162	0.152	2.763	0.123	3.054	0.133

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค22 กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ อายุ 7 วันในน้ำ

% ซีโอไลท์		กำลังรับแรงอัด (กก. /ซม^2.)	ค่าเฉลี่ย
0%	1	284.26	325.46
	2	373.65	
	3	318.48	
2.5%SZ	1	327.28	310.35
	2	298.18	
	3	305.58	
10%SZ	1	218.42	222.28
	2	217.99	
	3	230.43	
20%SZ	1	192.38	194.11
	2	198.51	
	3	191.44	
10%NZ	1*	175.51	234.24
	2	235.62	
	3	232.86	
20%NZ	1	214.40	221.40
	2	232.77	
	3	217.01	

*Outliner

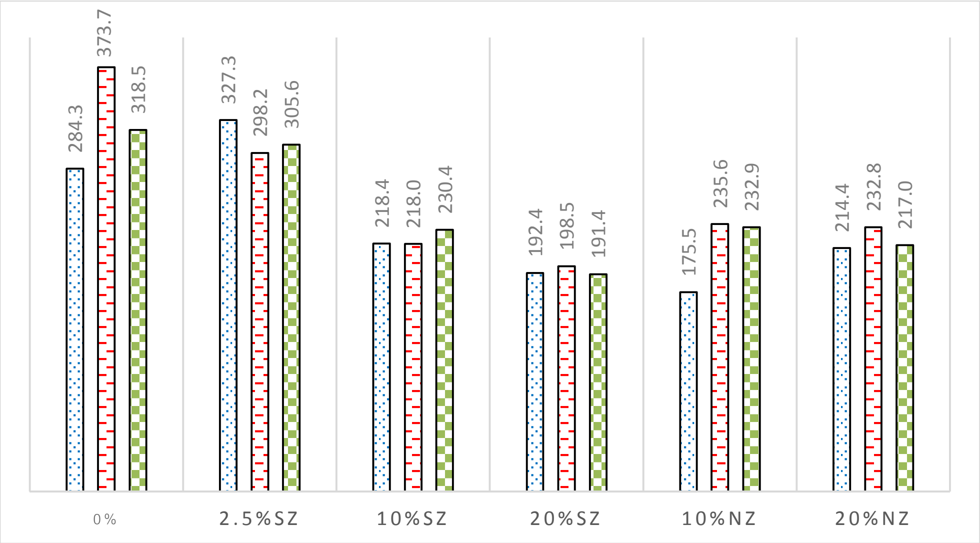
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค23 กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ อายุ 28 วันในน้ำ

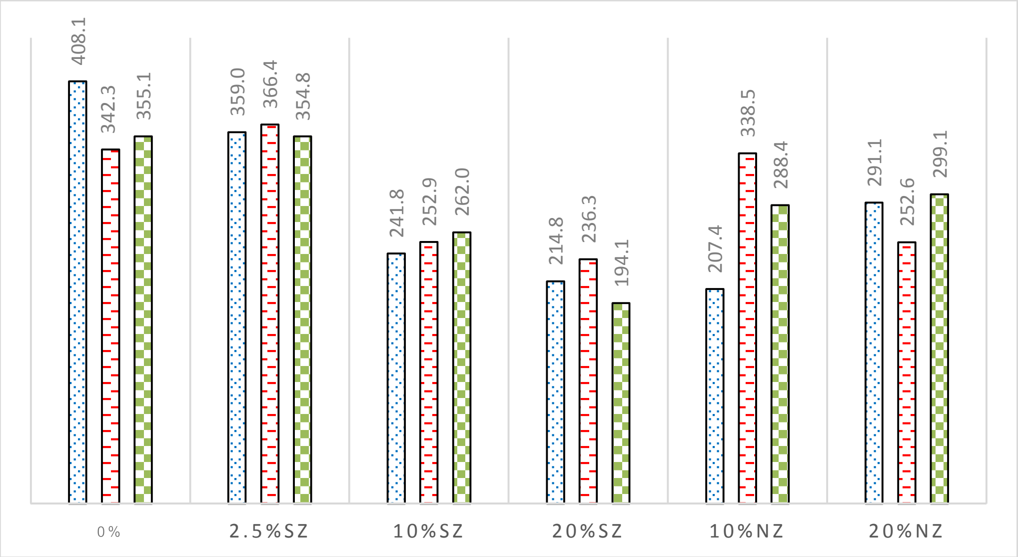
% ซีโอไลท์		กำลังรับแรงอัด (กก. /ซม^2.)	ค่าเฉลี่ย
0%	1*	408.08	368.47
	2	342.27	
	3	355.07	
2.5%SZ	1	359.03	360.08
	2	366.40	
	3	354.81	
10%SZ	1	241.81	252.32
	2	252.94	
	3	262.20	
20%SZ	1	214.84	215.07
	2	236.31	
	3	194.06	
10%NZ	1*	207.41	313.48
	2	338.54	
	3	288.41	
20%NZ	1	291.06	280.91
	2	252.60	
	3	299.07	

*Outliner

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ค1 กำลังอัดของลูกบากศ์มอร์ต้าร์ที่ อายุ 7 วันในน้ำ



ภาพผนวกที่ ค2 กำลังอัดของลูกบากศ์มอร์ต้าร์ที่ อายุ 28 วันในน้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค24 ผลการทดสอบการไหลของซีเมนต์เพสต์

%Zeolite	D_1	D_2	D_3	D_4	$D_{average}$	D_0	%Flow
0%	41.0	39.0	44.0	45.0	42.3	20.0	111.3
0.5%SZ	50.0	45.0	37.5	35.5	42.0	20.0	110.0
1.0%SZ	40.0	42.5	43.5	42.0	42.0	20.0	110.0
1.5%SZ	40.0	40.0	42.5	43.5	41.5	20.0	107.5
2.5%SZ	41.5	42.5	43.5	41.0	42.1	20.0	110.6
10%SZ	35.0	36.5	40.0	39.5	37.8	20.0	88.8
20%SZ	26.0	26.0	26.0	26.5	26.1	20.0	30.6
10%NZ	34.5	34.0	32.0	32.5	33.3	20.0	66.3
20%NZ	29.0	30.0	26.5	25.5	27.8	20.0	38.8

ตารางผนวกที่ ค25 ผลการทดสอบการไหลของมอร์ต้าร์

%Zeolite	D_1	D_2	D_3	$D_{average}$	D_0	%Flow
0%	13.7	13.7	13.7	13.7	10.0	37.0
0.5%SZ	14.2	14.2	13.4	13.9	10.0	39.3
1.0%SZ	14.6	13.5	14.6	14.2	10.0	42.3
1.5%SZ	14.3	14.7	14.3	14.4	10.0	44.3
2.5%SZ	14.0	13.5	14.0	13.8	10.0	38.3
10%SZ	12.4	13.0	13.3	12.9	10.0	29.0
20%SZ	11.0	13.0	12.0	12.0	10.0	20.0
10%NZ	10.5	10.5	10.5	10.5	10.0	5.0
20%NZ	10.3	10.0	10.0	10.1	10.0	1.0

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบพฤติกรรมการควบคุมการขยายตัวของคอนกรีตระยะยาว

สมบัติทางกล และความสามารถในการเท

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง1 การขยายตัวของชุดคอนกรีตควบคุม (RILEM AAR4)

Age	ref	W1 (g)	1*	%	Weight 2 (g)	2	%
0	5.203	3845.3	2.836	0.000	3825.800	3.390	0.000
5	5.203	3898.6	3.001	0.065	3875.400	3.441	0.020
10	5.203	3899.7	3.001	0.065	3876.700	3.442	0.020
15	5.203	3905.6	3.017	0.071	3882.400	3.450	0.024
20	5.203	3905.4	3.010	0.069	3881.500	3.474	0.033

Weight 2 (g)	2	%	Weight 3 (g)	3	%	Average (%)
3825.800	3.390	0.000	3865.100	3.012	0.000	0.000
3875.400	3.441	0.020	3918.700	3.061	0.019	0.020
3876.700	3.442	0.020	3920.000	3.088	0.030	0.025
3882.400	3.450	0.024	3925.500	3.074	0.024	0.024
3881.500	3.474	0.033	3925.500	3.062	0.020	0.026

*Outliner

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง2 การขยายตัวของชุดคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 0.5% (RILEM AAR4)

Age (week)	ref	Weight 1 (g)	1	%	Weight 2 (g)	2	%
0	5.440	3927.2	6.218	0.000	0.000	6.555	0.000
5	5.440	3933.1	6.334	0.046	3991.2	6.621	0.026
10	5.440	3932.9	6.341	0.048	3995.5	6.600	0.018
15	5.440	3933.3	6.324	0.042	3997.7	6.592	0.015
20	5.440	3934.6	6.301	0.033	3998.7	6.569	0.006

Weight 2 (g)	2	%	Weight 3 (g)	3	%	Average (%)
0.000	6.555	0.000	0.000	6.418	0.000	0.000
3991.2	6.621	0.026	3887.9	6.427	0.004	0.025
3995.5	6.600	0.018	3895.6	6.425	0.003	0.023
3997.7	6.592	0.015	3897.3	6.420	0.001	0.019
3998.7	6.569	0.006	3896.4	6.419	0.000	0.013

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง3 การขยายตัวของชุดคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 1.5% (RILEM AAR4)

Age (week)	ref	Weight 1 (g)	1	%	Weight 2 (g)	2	%
0	5.440	3752.8	5.254	0.000	3791.8	4.620	0.000
5	5.440	3796.9	5.313	0.023	3828.3	4.620	0.000
10	5.440	3803.0	5.298	0.017	3834.8	4.606	-0.006
15	5.440	3803.6	5.259	0.002	3829.6	4.595	-0.010
20	5.440	3803.9	5.237	-0.007	3834.1	4.577	-0.017

Weight 2 (g)	2	%	Weight 3 (g)	3	%	Average (%)
3791.8	4.620	0.000	3823.5	4.323	0.000	0.000
3828.3	4.620	0.000	3864.0	4.352	0.011	0.012
3834.8	4.606	-0.006	3876.3	4.321	-0.001	0.004
3829.6	4.595	-0.010	3871.3	4.317	-0.002	-0.003
3834.1	4.577	-0.017	3873.5	4.297	-0.010	-0.011

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง4 การขยายตัวของชุดคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ปรับปรุงแทนที่ 2.5% (RILEM AAR4)

Age (week)	ref	Weight 1 (g)	1	%	Weight 2 (g)	2	%
0	5.440	3771.2	5.264	0.000	3843.5	5.586	0.000
5	5.440	3807.4	5.129	-0.053	3874.6	5.522	-0.025
10	5.440	3812.5	5.059	-0.081	3878.3	5.505	-0.032
15	5.440	3809.7	5.055	-0.082	3877.6	5.469	-0.046
20	5.440	3813.4	5.036	-0.090	3880.9	5.432	-0.061

Weight 2 (g)	2	%	Weight 3 (g)	3	%	Average (%)
3843.5	5.586	0.000	3800.7	5.751	0.000	0.000
3874.6	5.522	-0.025	3832.4	5.728	-0.009	-0.029
3878.3	5.505	-0.032	3836.9	5.657	-0.037	-0.050
3877.6	5.469	-0.046	3836.2	5.615	-0.054	-0.061
3880.9	5.432	-0.061	3837.9	5.577	-0.069	-0.073

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง5 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของคอนกรีต

Age	%Zeolite		Compressive Strength (ksc)	Tensile Strength (ksc)	Modulus of elasticity (ksc)
28d	0%	1	285.4	33.2	-*
		2	295.3	32.8	302713.0
		3	294.3	31.6	303224.0
		Average	291.6	32.5	302968.5
10week	0%	1	276.4	30.9	84163.1
		2	287.2	31.0	103177.0
		3	291.7	30.5	-*
		Average	285.1	30.8	93670.0
	1.0%MZ	1	371.5*	31.9	100883.0
		2	331.4	33.4	122334.0
		3	316.4	33.2	98934.0
		Average	323.9	32.9	107383.7
	1.5%MZ	1	294.0	36.7	104596.0
		2	291.8	35.3	113994.0
		3	302.6	26.1*	97629.0
		Average	296.1	36.0	105406.3
	2.5%MZ	1	328.3	33.5	127325.0
		2	321.2	29.5	132056.0
		3	313.7	27.6	92022.0*
		Average	321.1	30.2	129690.5

*Outliner

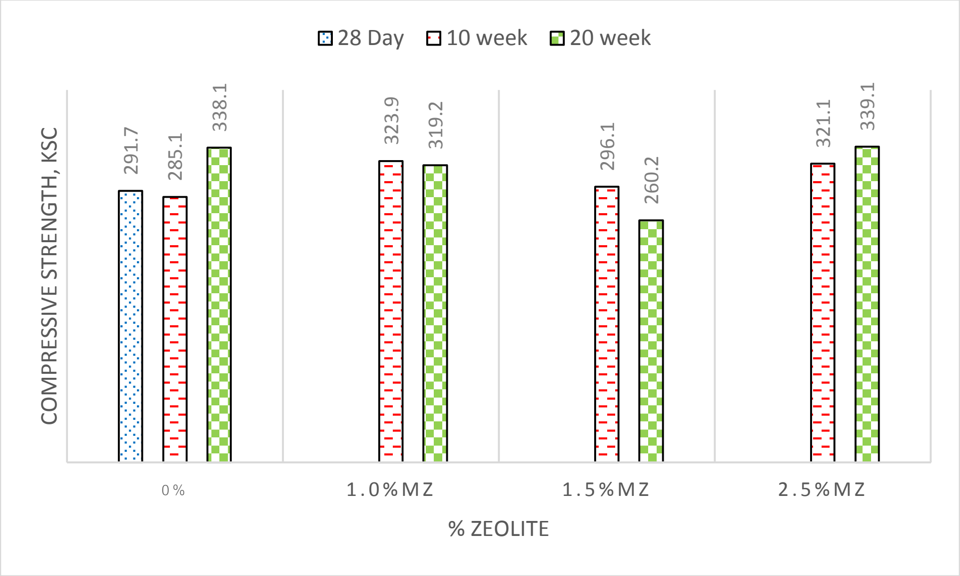
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง5 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของคอนกรีต (ต่อ)

Age	%Zeolite		Compressive Strength (ksc)	Tensile Strength (ksc)	Modulus of elasticity (ksc)
20week	0%	1	257.8*	31.5	-*
		2	337.8	31.8	138067.0
		3	338.3	30.1	146762.0
		Average	338.1	31.1	142414.5
	1.0%MZ	1	300.9	27.5	103633.4
		2	326.3	20.9	81878.5
		3	330.5	32.9	-*
		Average	319.2	27.1	92756.0
	1.5%MZ	1	245.1	31.6	149637.0
		2	236.1	32.9	195102.3
		3	299.4	33.7	58167.2*
		Average	260.2	32.7	172369.6
	2.5%MZ	1	359.4	24.8*	204628.9
		2	318.9	34.3	-*
		3	234.1*	33.5	133920.6
		Average	339.1	33.9	169274.8

*Outliner

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ง1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่ อายุต่างๆ

ภาพผนวกที่ ง2 กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตทรงกระบอกที่ อายุต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ ง3 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทรงกระบอกที่ อายุต่างๆ

ตารางผนวกที่ ง6 ผลการทดสอบค่าความยุบตัวของคอนกรีต

%Zeolite	Slump loss (cm.)
0%	9.5
1.0%MZ	8.3
1.5%MZ	7.7
2.5%MZ	7.7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายชนากร วงศ์ธนสารสิน
เกิดวันที่	30 พฤศจิกายน พ.ศ. 2532
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	วิศวกรโยธา
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท ไคเซอร์ คอนสตรัคชั่น (ประเทศไทย) จำกัด
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์