



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง อิทธิพลของมวลรวมจากเขตรอยเลื่อน และคลอไรด์ ต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

Influence of Fault Zone Aggregates and Chloride on Alkali Silica Reaction

نامผู้วิจัย นายวัชรกร วงศ์คำจันทร์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์สุวิมล สัจจาณิชย์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ประเสริฐ สุวรรณวิทยา, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์กฤษณ์ วันอินทร์, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัยยอดสุดใจ, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบสิ่งนี้ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อิทธิพลของมวลรวมจากเขตรอยเลื่อน และคลอไรด์ ต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

Influence of Fault Zone Aggregates and Chloride on Alkali Silica Reaction

โดย

นายวัชรกร วงศ์คำจันทร์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัชรกร วงศ์คำจันทร์ 2557: อิทธิพลของมวลรวมจากเขตรอยเลื่อน และคลอไรต์ ต่อ
ปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ปริญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชา
วิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์
สุวิมล สัจจาณิชย์, Ph.D. 177 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของมวลรวมบนเขตรอยเลื่อนต่อปฏิกิริยา
แอลคาไลซิลิกา จากมวลรวมตัวอย่างจากแหล่งหินเดียวกันแต่ต่างบริเวณ ในภาคตะวันออกของ
ประเทศไทย ได้แก่ มวลรวมในแนวเขตรอยเลื่อน (Fault Zone, FZ) มวลรวมบริเวณขอบเขตของ
รอยเลื่อนที่มีควอตซ์ปะปน (Moderate Quartz Zone of Greywacke, MZ) และมวลรวมหิน
แกรัยแควส่วนใหญ่นอกเขตรอยเลื่อน (Large Zone of Greywacke, LZ) นอกจากนี้ยัง
ทำการศึกษาการปรากฏการณ์เพสซิมัม และผลกระทบจากคลอไรต์เนื่องจากการแพร่ที่มีต่อ
ปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

ผลการศึกษาพบว่า มวลรวมในแหล่งเดียวกัน มีความคล้ายคลึงกันในองค์ประกอบออกไซด์
ในขณะที่ FZ มีองค์ประกอบทางแร่และลักษณะทางกายภาพแตกต่างจากมวลรวมอื่นอย่างชัดเจน
ผลการวิเคราะห์หน้าตัดแบบบางพบว่า FZ จัดอยู่ในประเภท Class III “very likely to be alkali-
reactive” ซึ่งบ่งชี้ว่ามวลรวมในเขตรอยเลื่อนมีแนวโน้มเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาสูงกว่ามวลรวม
อื่นในแหล่งเดียวกัน จากการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาของแท่งมอร์ตาร์ คอนกรีตไมโครบาร์ และ
คอนกรีตปรีซึม FZ มีการขยายตัวสูงสุด การค้นพบนี้ยืนยันด้วยผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์
ดิจิตอล กล้องจุลทรรศน์ออปติคัล และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด อย่างไรก็ตามไม่พบการเกิดปรากฏการณ์เพสซิมัมของมวลรวม FZ

การศึกษาผลกระทบของโซเดียมคลอไรต์ โดยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของคอนกรีต
ปรีซึมและการแพร่ พบว่าโซเดียมคลอไรต์ทำให้เกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาลดลง นอกจากนี้จาก
การวิเคราะห์ข้อไฟฟ้าออสโมบรูสมพบว่าเมื่อมีความเข้มข้นของคลอไรต์เพิ่มขึ้นทำให้การขยายตัวลดลง
และการวิเคราะห์พลาสมาเหนี่ยวนำคู่ควยังพบว่าเมื่อคลอไรต์มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นความเข้มข้น
ของโซเดียมออสโมบรูสมจะเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของโพตัสเซียมออสโมบรูสมลดลง และดัชนีความเป็นผลึกของ
มวลรวมเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของคลอไรต์เพิ่มขึ้น

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Watcharagon Wongkamjan 2014: Influence of Fault Zone Aggregates and Chloride on Alkali Silica Reaction. Doctor of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Suvimol Sujjavanich, Ph.D. 177 pages.

This study aimed to investigate the influence of fault zone aggregates on alkali silica reaction (ASR) using aggregates from the same source but from different areas. In east of Thailand; fault zone aggregates (FZ), moderate quartz zone of greywacke aggregates (MZ) and large zone of greywacke aggregates (LZ). Moreover pessimum effect and effects of chloride diffusion on ASR were also studied.

The results indicated that all studied aggregates were quite similar in oxide compositions while FZ was different in mineral compositions and physical characteristics. Thin-section analysis indicated that FZ was classified of Class III “very likely to be alkali-reactive”. The findings indicated that the fault zone aggregates increased the ASR risk and may be considered as more deleterious than those of the other aggregates. The largest expansion of FZ was observed from accelerated methods of mortar-bar, concrete microbar and concrete prism. The results of thin-section, Opto-digital microscopy and SEM also confirmed this finding. However evidence of pessimum effect of FZ was not observed.

Study on the effects of sodium chloride by accelerated expansion of concrete prisms, showed that chloride ions reduced ASR reactivity. The analysis of ASR products using ion-selective electrodes technique showed that the higher of chloride concentration decreased expansion and inductive coupled plasma analysis also shown that the higher chloride concentration increased sodium and the decreased of potassium ions concentration. The crystallinity index of aggregates tended to increase as the chloride concentration increased.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จด้วยดีได้เนื่องจากความช่วยเหลือเอาใจใส่เป็นอย่างดี จากบุคคลที่มีส่วนร่วมหลายฝ่าย โดยเฉพาะรองศาสตราจารย์สุวิมล สัจจาฉนิษฐ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ให้คำปรึกษาแนะนำเรื่องของการศึกษาวิจัย ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ เปิดโอกาสข้าพเจ้าได้พัฒนาตนเองสู่วงวิชาการในระดับประเทศและสากล ศิษย์ขอกราบขอบพระคุณ มา ณ โอกาสนี้ ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ประเสริฐ สุวรรณวิทยา และอาจารย์กฤษณ์ วันอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ซึ่งให้คำปรึกษาและแนะนำในสิ่งที่จำเป็นประโยชน์ในงานวิจัย Professor Yokota Hiroshi และ Assistant Professor Hashimoto Katsufumi ที่ให้ความกรุณาเวลาประสานงาน ดูแลให้คำปรึกษา ตลอดจนร่วมทำวิจัย ขณะที่ทำการวิจัย ณ Hokkaido University ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ดหน่วยงานต้นสังกัด สำหรับโอกาสในการศึกษา ขอขอบคุณโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษา สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ ตลอดจนสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับทุนในการศึกษาวิจัย การวิเคราะห์และการเตรียมตัวอย่างบางส่วนได้รับการสนับสนุนจาก บริษัท สยามวิจัยและพัฒนา จำกัด และบุคลากรของบริษัท โดยเฉพาะ คุณมนสิข สาริกฤติ ดร. โรจนกร กันตพงษ์ คุณปณณมาน นรรัตน์ คุณธนศ กิ่งรางสาด ซึ่งขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ ขอขอบคุณ บริษัท ควอลิตี้ฟอรัท จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์กล้องจุลทรรศน์ออปโตดิจิทัลในการศึกษา ขอขอบคุณโรงโม่และเหมืองหินทุกแห่งที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างในการทดสอบซึ่งไม่สามารถระบุรายชื่อ ขอขอบคุณบุคลากรและคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการประสานงานและการใช้ห้องปฏิบัติการ ฟิ น้อง ณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ Lifetime Engineering Laboratory และ Hokkaido University สำหรับช่วงเวลาที่ดีและกำลังใจ บุคคลต่างๆ ที่ให้ความช่วยเหลือเหลืออีกมากที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าว นามได้หมด ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของท่านจึงกราบขอบพระคุณ และขอขอบคุณไว้ในโอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ทุกๆ ท่าน รวมถึงคุณจิตราภรณ์ วงศ์คำจันทร์ และเด็กชายเมทัส วงศ์คำจันทร์ ที่ได้มอบกำลังใจ สนับสนุน และอยู่เคียงข้างข้าพเจ้าเสมอมา จนทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้

วัชรกร วงศ์คำจันทร์

มิถุนายน 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(16)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	53
อุปกรณ์	54
วิธีการ	57
ผลและวิจารณ์	72
สรุปและข้อเสนอแนะ	109
สรุป	109
ข้อเสนอแนะ	111
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	112
ภาคผนวก	125
ภาคผนวก ก อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	126
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์	131
ภาคผนวก ค การสำรวจภาคสนามแหล่งมวลรวมที่มีแนวโน้มเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา	140
ภาคผนวก ง การหาค่าประกอบทางแร่ของมวลรวมด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	143
ภาคผนวก จ ผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยา สำหรับการศึกษาอิทธิพลของมวลรวมในเขตรอยเลื่อนที่มีต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา	146
ภาคผนวก ฉ ภาพตัวอย่างหน้าตัดแบบบางจากกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล	152
ภาคผนวก ช การวิเคราะห์ด้วยกล้องออปโตดิจิทัล	161

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ซ การวิเคราะห์ด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและ การวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์	167
ภาคผนวก ฌ ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่เป็นส่วนผสมระหว่าง มวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้และมวลรวมที่ไม่ทำปฏิกิริยา	169
ภาคผนวก ญ ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีตปรีซีมที่สภาวะแวดล้อม ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์	171
ภาคผนวก ฎ ผลการทดสอบความเข้มข้นของไอออนในคอนกรีตปรีซีม ภายใต้สภาวะแวดล้อมคลอไรด์	173
ภาคผนวก ฏ ค่าการสะท้อนของรังสีเอกซ์และการคำนวณดัชนีความเป็นผลึก	175
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	177

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 วัสดุในธรรมชาติบางชนิดที่มีแนวโน้มการตอบสนองต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในคอนกรีต	13
2 ระดับความเสี่ยงต่อปฏิกิริยาอัลคาไลคาร์บอนेट	15
3 สรุปวิธีการทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในมวลรวม	38
4 วิธีการทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในมวลรวม ตามมาตรฐาน RILEM	42
5 วิธีทดสอบและเกณฑ์ในการทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในมวลรวม	43
6 แหล่งหินที่อาจมีปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในประเทศไทย	57
7 กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาแนวโน้มที่อาจมีปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา	60
8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของมวลรวมด้วยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ (XRF)	73
9 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของมวลรวมด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	74
10 ผลการวิเคราะห์ด้วยรูปภาพ	85
11 ผลการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์	93
12 ผลการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างในสภาวะแวดล้อมคลอไรด์	107
ตารางผนวกที่	
จ1 ผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์	147
จ2 ผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งคอนกรีตไมโครบาร์	149
จ3 ผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของคอนกรีตปรีซิม	150
ณ ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่เป็นส่วนผสมระหว่างมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้และมวลรวมที่ไม่ทำปฏิกิริยา	170
ญ1 ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีตปรีซิมที่สภาวะแวดล้อมของสารละลายโซเดียมคลอไรด์	172

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ญ2	ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีตปรีซึมที่สภาวะแวดล้อมของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในแต่ละบริเวณ	172
ฎ1	ผลการทดสอบความเข้มข้นของไอออนในคอนกรีตปรีซึม ภายใต้สภาวะแวดล้อมคลอไรด์	174
ฎ1	ค่าการสะท้อนของรังสีเอกซ์และการคำนวณดัชนีความเป็นผลึก	176

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 Stanton และโครงสร้างสะพานคอนกรีตที่พบปฏิกิริยาอัลคาไลกับมวลรวมครั้งแรก	7
2 การแตกร้าวระดับอนุภาค (Microcrack) ในคอนกรีตที่เกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา	7
3 ปริมาณโปตัสเซียมออกไซด์ในเม็ดปูน (Clinker) ณ อุณหภูมิเฉลี่ยต่างๆกันในเตาเผา	10
4 โครงสร้างของซิลิโคนไดออกไซด์ที่ (ก) สถานะผลึกโดยสมบูรณ์ และ (ข) สถานะผลึกไม่สมบูรณ์	11
5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัวของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาและระดับความชื้นสัมพัทธ์	12
6 การเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลคาร์บอนेट (ก) การเกิดปฏิกิริยาโดโลไมต์ในหิน Dolostone ก่อให้เกิดหลุมคาร์บอนेटโดยที่ไม่เกิดการแตกร้าว (ข) การเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลคาร์บอนेट ร่วมกับปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา	14
7 รายงานการเกิดปัญหาปฏิกิริยาระหว่างแอลคาไลซิลิกาในประเทศต่างๆ	16
8 กรณีศึกษาของโครงสร้างที่เกิดปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในประเทศต่างๆ (ก) ปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาที่เกิดกับของแข็ง Maentwong เวลล์ สหราชอาณาจักร (ข) ความเสียหายที่เกิดกับผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กในนิวซีแลนด์ (ค) คราบขาวแลปรากฏการณ์ efflorescence ของ ASR-Gel ในฐานรากของสะพานอายุ 25 ปีในสหรัฐอเมริกา (ง) รอยแตกร้าวในแนวพื้นตอม่อและฐานรากของสะพานอายุ 20 ปี ในสหรัฐอเมริกา	17
9 กรณีศึกษาของปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในภูมิภาคทวีปเอเชีย (ก) โครงสร้างเสารูปตัว T ในประเทศญี่ปุ่น (ข) รอยแตกร้าวผ่านมวลรวมจากการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาของมวลรวมจากประเทศจีน (ค) ขอบปฏิกิริยาสีดำรอบมวลรวมที่เกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา จากชิ้นส่วนคอนกรีตในประเทศอินเดีย (ง) รอยแตกร้าวแบบแผนที่บนสะพาน Pontian ในประเทศมาเลเซีย	18

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
10	รอยแตกร้าวและคราบขาวที่พบในสะพาน Schoonhoven ในประเทศเนเธอร์แลนด์ ที่พบปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา	19
11	รอยแตกร้าวที่พบในราวสะพานข้ามแม่น้ำ Red Run สหรัฐอเมริกา จากปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาและการแก้ไข	19
12	การขยายตัวของตัวอย่างภายใต้การเร่งการขยายตัว จากกรณีศึกษาในประเทศ	20
13	ตัวอย่างคอนกรีตเจาะแสดงรอยแตกร้าว ที่เกิดจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา จากกรณีศึกษาในประเทศ	20
14	การสะท้อนแสงของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการพ่นด้วย Uranyl Acetate ด้านซ้าย ภายใต้แสงธรรมชาติ และด้านขวาภายใต้แสง อัลตราไวโอเลต (ก) จากชิ้นส่วนโครงสร้างจริงที่แตกร้าวจนหลุดร่อน (ข) และ (ค) จากแท่งตัวอย่างที่ตัดมาจากตัวอย่างคอนกรีตเจาะ จากโครงสร้างเดียวกัน	21
15	สะพาน Marsh Mills Viaducts ในประเทศอังกฤษ (ก) พบรอยร้าวทั่วไปที่ฐาน (ข) การค้ำยันเสาต่อม่อที่ด้วยโครงสร้างเหล็กเพื่อช่วยในการรับน้ำหนักชั่วคราวและ(ค) ต้องทุบทิ้ง และ (ง) สร้างใหม่	22
16	การเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตที่เกิดปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในแอฟริกาใต้ (ก) โครงสร้างโดยรวม (ข) การสกัดรอยแตกร้าวในต่อม่อ (ค) การเสริมเหล็กเพิ่ม (ง) การเสริมกำลังภายนอกเพิ่มด้วยวิธีอัดแรงหลังจากเทคอนกรีตทับ	23
17	(ก) การซ่อมแซมโครงสร้างที่เกิดปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาโดยการฉีดอัดอีพอกซี (ข) คอนกรีตที่เจาะเพื่อตรวจสอบความลึกของอีพอกซีที่ซึมเข้าไปได้ในรอยร้าว	24
18	การใช้สารละลาย LiNO_3 ฉีดพ่นผิวหน้าของผิวทางคอนกรีตที่รัฐไอดาโฮ สหรัฐอเมริกา	24
19	การฉีดพ่นสารละลาย Silane เพื่อลดปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาของคันกันถนนในแคนาดา	25

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ลักษณะความเสียหายจากปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาจำแนกตามรูปแบบ (ก) การแตกร้าวแบบขนาน (ข) รอยแตกร้าวแบบแผ่นที่ (ค) การหลุดร่อนของมวลรวม (ง) การแตกร้าวภายในมวลรวม (จ) ร่องรอยการไหลซึมของเจลบนผิวภายนอก	31
21	เปรียบเทียบการเร่งอัตราการขยายตัวของวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งคอนกรีตไมโครบาร์และวิธีคอนกรีตปริซึม	33
22	(ก) เปรียบเทียบการเร่งอัตราการขยายตัวของวิธีเร่งปฏิกิริยาของคอนกรีตปริซึมและวิธีคอนกรีตปริซึม (ข) เปรียบเทียบทั้งสองวิธีกรณีที่ใช้สารผสมเพิ่ม	34
23	การลดลงของค่า pH ในวิธีเร่งปฏิกิริยาของคอนกรีตปริซึมและวิธีคอนกรีตปริซึม	35
24	การศึกษาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาด้วยแท่งคอนกรีตขนาดใหญ่ในสนาม (ก-ค) Building Research Establishment (BRE) ประเทศอังกฤษ แท่งคอนกรีตมีอายุ 11 ปี (ข) แท่งคอนกรีตควบคุม (ค) แท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 25 (ง) The University of Texas in Austin สหรัฐอเมริกา และ (จ) CANMET-MTL แคนาดา	36
25	การสะท้อนแสงของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการพ่นด้วย Uranyl Acetate ภายใต้แสงธรรมชาติ (ด้านซ้าย) และภายใต้แสง UV ในห้องมืด (ด้านขวา)	37
26	กระบวนการทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลมวลรวมของ RILEM	42
27	การสะท้อนของจุดสูงสุดของวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ใช้ในการหาค่าดัชนีความเป็นผลึก	44
28	ดัชนีความเป็นผลึก และการสะท้อนของจุดสูงสุดของวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่มีระดับการทำปฏิกิริยาได้ของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาแตกต่างกัน	45
29	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเป็นผลึกและการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์จากการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยา	46
30	(ก) SEM ของ แอลคาไลซิลิกาเจล ณ บริเวณผิวของมวลรวม โดยตำแหน่งที่ 1 ถึง 10 เป็นตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ด้วย EDS (ข) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จาก ASR ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
31 การเปลี่ยนแปลงของระดับความเป็นด่าง (alkalinity) ทั้งปริมาณโซเดียมและโปตัสเซียมในสารละลายในช่องว่างจากคอนกรีตปรีซึมในแต่ละช่วงเวลา	48
32 ความสมดุลระหว่างฮีตในสารละลายในช่องว่างจากมอร์ตาร์บาร์	48
33 หินแกรนิตที่เก็บจากแหล่งหิน (ก) ภายนอกเขตรอยเลื่อน และ (ข) ภายในเขตรอยเลื่อน	49
34 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัว และปริมาณมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้	51
35 การขยายตัวของมอร์ตาร์บาร์ที่อัตราส่วนของมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ต่อปริมาณซีเมนต์	51
36 การขยายตัวของคอนกรีตในห้องทดสอบ	52
37 การขยายตัวของคอนกรีตปรีซึม (ASTM C1293) จากมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ที่สภาพแวดล้อมต่างกัน	52
38 แนวเขตรอยเลื่อนพาดผ่านแหล่งมวลรวม EGW2	61
39 (ก) ภาพถ่ายดาวเทียมแหล่งมวลรวม และ (ข) แผนผังตำแหน่งการเก็บตัวอย่างทดสอบ	62
40 ตัวอย่างหิน (ก) FZ (ข) MZ และ (ค) LZ	63
41 การจำลองสภาวะแวดล้อมภายใต้การแพร่ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (ก) NA (ข) CD3 และ CD 6 (ค) CI3 และ CI6	65
42 การวิเคราะห์ทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ ของตัวอย่างหน้าตัดแบบบาง (ก) FZ (ข) MZ (ค) LZ	75
43 ค่าเฉลี่ยการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่อายุ (ก) 16 วัน หลังถอดแบบ และ (ข) 108 วัน หลังถอดแบบ	77
44 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งคอนกรีตไมโครบาร์ (ก) ที่อายุ 28 วัน หลังถอดแบบ และ (ข) 108 วันหลังถอดแบบ	79
45 ผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของคอนกรีตปรีซึมที่อายุ (ก) 140 วัน หลังถอดแบบ และ (ข) 259 วัน หลังถอดแบบ	81
46 ตัวอย่างแท่งคอนกรีตปรีซึมที่ทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของคอนกรีตปรีซึมที่ (ก) 35 วัน (ข) 75 วัน และ (ค) 140 วัน (SZ คือ สัญลักษณ์เดิมของ FZ)	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
47 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลหน้าตัดแบบบางของตัวอย่างแท่งมอร์ตาร์ของ (ก) FZ (ข) MZ (ค) LZ ที่กำลังขยาย 40 เท่า และ (ง) FZ (จ) MZ (ฉ) LZ ที่กำลังขยาย 100 เท่า	83
48 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล หน้าตัดแบบบางของตัวอย่างแท่งไมโครบาร์ ของ (ก) FZ (ข) MZ (ค) LZ และการวิเคราะห์ด้วยรูปภาพ (ง) FZ (จ) MZ (ฉ) LZ โดยสีเทา คือมวลรวม สีดำคือซีเมนต์เฟส และสีขาวคือรอยแตกร้าว	84
49 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลหน้าตัดแบบบางของตัวอย่างคอนกรีตปรีซึม (ก) FZ (ข) MZ และ (ค) LZ	85
50 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลหน้าตัดเคลือบและขัดของตัวอย่างคอนกรีตไมโครบาร์ (ก) FZ (ข) MZ และ (ค) LZ	86
51 การวิเคราะห์หน้าตัดเคลือบและขัดด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลตัวอย่างคอนกรีตปรีซึมที่กำลังขยาย 50 เท่า (ก) FZ (ข) MZ และ (ค) LZ	87
52 การวิเคราะห์หน้าตัดเคลือบและขัดตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตปรีซึม ด้วยกล้องออปโตดิจิทัล (ก) FZ (ข) MZ และ (ค) LZ	88
53 การวิเคราะห์หน้าตัดเคลือบและขัดตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตปรีซึม FZ ด้วยกล้องออปโตดิจิทัล ที่กำลังขยาย (ก) 250 เท่า (ข) 1,000 เท่า และ (ค) 3,000 เท่า	89
54 ตัวอย่างมอร์ตาร์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 100 เท่า (ก) FZ (ข) MZ และ (ค) LZ และ ที่ 2,000 เท่า (ง) FZ (จ) MZ และ (ฉ) LZ	90
55 ตัวอย่างคอนกรีตไมโครบาร์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า (ก) FZ (ข) MZ และ (ค) LZ และที่ 2,000 เท่า (ง) FZ (จ) MZ และ (ฉ) LZ	90
56 การวิเคราะห์โดยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หน้าตัดเคลือบและขัดของตัวอย่างคอนกรีตปรีซึม (ก) FZ (ข) MZ (ค) LZ และการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์ (ง) FZ (จ) MZ (ฉ) LZ	92
57 การวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์ ณ จุดที่รังสีเอกซ์มีการสะท้อนสูงสุดที่มุมของสารประกอบอัลคาไล	93

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
58 ผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ดมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ (FZ) และมวลรวมที่ไม่ทำปฏิกิริยา (NEBS2)	94
59 การขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ด ที่เป็นส่วนผสมระหว่างมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ และมวลรวมที่ไม่ทำปฏิกิริยา (ก) ที่อายุ 16 วัน และ (ข) ที่อายุ 65 วัน	95
60 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของอัตราการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ด และร้อยละมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้	95
61 การขยายตัวของคอนกรีตปรีซีมที่สภาวะแวดล้อมของสารละลายโซเดียมคลอไรด์	96
62 การขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ดที่สภาวะแวดล้อมของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน (ก) CD3 ที่บริเวณ 1 ถึง 4 (ข) CD6 ที่บริเวณ 1 ถึง 4	97
63 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล หน้าตัดเคลือบและขีดของตัวอย่างคอนกรีตปรีซีม (ก) NA (ข) CD3 (ค) CD6 (ง) CI3 และ (จ) CI6	97
64 ความเข้มข้นของคลอไรด์ ภายใต้สภาวะแวดล้อมคลอไรด์ อายุ ความลึก ที่แตกต่างกัน	99
65 ผลกระทบจากความเข้มข้นของคลอไรด์ต่อการขยายตัวของคอนกรีตปรีซีม	99
66 ความเข้มข้นของโพตัสเซียมไอออนจากการวิเคราะห์พลาสมาเหนี่ยวนำคู่ควบ	100
67 ความเข้มข้นของโซเดียมไอออนจากการวิเคราะห์พลาสมาเหนี่ยวนำคู่ควบ	100
68 ผลกระทบจากความเข้มข้นของคลอไรด์ต่อความเข้มข้นของอัลคาไลไอออน	101
69 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ค่าการสะท้อนของรังสีที่มุม 2θ ระหว่าง 67 ถึง 69 องศา และดัชนีความเป็นผลึก (CI) สำหรับคอนกรีตปรีซีม ณ ตำแหน่งเดียวกันแต่อยู่ในสภาวะแวดล้อมคลอไรด์ต่างกัน	102
70 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และดัชนีความเป็นผลึก (CI) สำหรับตัวอย่างคอนกรีตเดียวกันแต่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ต่างกันจากการแพร่ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (ก) ความเข้มข้นร้อยละ 3 (ข) ความเข้มข้นร้อยละ 6	103
71 ผลกระทบจากความเข้มข้นของคลอไรด์ที่มีต่อดัชนีความเป็นผลึก	104
72 การวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) NA (ข) CD3 (ค) CD6 (ง) CI3 และ (จ) CI6 และตำแหน่ง ในการยิงรังสีเอกซ์ของชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์ (ข) NA (ข) CD3 (ณ) CD6 (ญ) CI3 และ (ฎ) CI6	106

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
73 เฟสไดอะแกรมสามแกนของการวิเคราะห์รังสีเอกซ์	107
74 อัตราส่วนอัลคาไลออกไซด์ต่อซิลิกา และอัตราส่วนแคลเซียมและแมกนีเซียมออกไซด์ต่อซิลิกา	108
ภาพผนวกที่	
ก1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ Rigaku - MultiFlex	127
ก2 Oxford/Horiba รุ่น XGT-2000W X-ray Analytical Microscope	127
ก3 อุปกรณ์การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์	127
ก4 แบบหล่อคอนกรีตไมโครบาร์ และเครื่องเปรียบเทียบความยาว	128
ก5 เครื่องเร่งปฏิกิริยาควบคุมอุณหภูมิและความชื้น	128
ก6 กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล สำหรับสไลด์วาร์นา (BX-41; Olympus)	128
ก7 กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล Nikon รุ่น Micropot-FXA	129
ก8 กล้องจุลทรรศน์ออปโตดิจิทัล Olympus DSX500	129
ก9 เครื่องวัดค่าไฟฟ้าไอออน Metrohm 781 pH/Ion meter	129
ก10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Philips XL 30	130
ก11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL JSM-6380LV และชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์ OXFORD IE 300	130
ก12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์ Shimadzu Corporation - Superscan SSX-550 SEM-EDX	130
ข1 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวมภาคตะวันออก	132
ข2 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวมภาคกลางและภาคตะวันตก	132
ข3 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวมภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	132

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข4 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวม ECS1	133
ข5 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวม EGN1	133
ข6 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวม EGN2	133
ข7 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวม EGW1	134
ข8 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวม EGW2	134
ข9 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวม ELS1	134
ข10 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวม ELS2	135
ข11 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวม CQZ1	135
ข12 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวม CRL1	135
ข13 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวม CAS1	136
ข14 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวม CAS2	136
ข15 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวม CAS3	136
ข16 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวม WNS1	137

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข17 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวม NEOS1	137
ข18 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวม NEBS1	137
ข19 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวม NEBS2	138
ข20 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวม NEBS3	138
ข21 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวม NEBS4	138
ข22 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวม NEBS5	139
ค1 แหล่งมวลรวมตัวอย่าง EGW1	141
ค2 แหล่งมวลรวมตัวอย่าง EGW2	141
ค3 แหล่งมวลรวมตัวอย่าง ELS1	141
ค4 แหล่งมวลรวมตัวอย่าง ELS2	142
ค5 แหล่งมวลรวมตัวอย่าง CRL1	142
ง1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของมวลรวมด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ของมวลรวม FZ	144
ง2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของมวลรวมด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ของมวลรวม MZ	144
ง3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของมวลรวมด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ของมวลรวม LZ	145
จ1 ผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่อายุ 16 วัน	148
จ2 ผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่อายุ 108 วัน	148
จ3 ผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งคอนกรีตไมโครบาร์ที่อายุ 28 วัน	149

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
จ4 ผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งคอนกรีตไมโครบาร์ที่อายุ 108 วัน	150
จ5 ผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของคอนกรีตปรีซึมที่อายุ 140 วัน	151
จ6 ผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของคอนกรีตปรีซึมที่อายุ 259 วัน	151
ฉ1 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลหน้าตัดแบบบางของตัวอย่างแท่งมอร์ตาร์ ของ FZ (ก) ที่กำลังขยาย 40 เท่า (ข) ที่กำลังขยาย 100 เท่า	153
ฉ2 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลหน้าตัดแบบบางของตัวอย่างแท่งมอร์ตาร์ ของ MZ (ก) ที่กำลังขยาย 40 เท่า (ข) ที่กำลังขยาย 100 เท่า	154
ฉ3 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลหน้าตัดแบบบางของตัวอย่างแท่งมอร์ตาร์ ของ LZ (ก) ที่กำลังขยาย 40 เท่า (ข) ที่กำลังขยาย 100 เท่า	155
ฉ4 (ก) การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลหน้าตัดแบบบางของตัวอย่างแท่งไมโครบาร์ ของ FZ ที่กำลังขยาย 40 เท่า (ข) การวิเคราะห์ด้วยรูปภาพ	156
ฉ5 (ก) การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลหน้าตัดแบบบางของตัวอย่างแท่งไมโครบาร์ ของ MZ ที่กำลังขยาย 40 เท่า (ข) การวิเคราะห์ด้วยรูปภาพ	157
ฉ6 (ก) การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลหน้าตัดแบบบางของตัวอย่างแท่งไมโครบาร์ ของ LZ ที่กำลังขยาย 40 เท่า (ข) การวิเคราะห์ด้วยรูปภาพ	158
ฉ7 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลหน้าตัดแบบบางตัวอย่างคอนกรีตปรีซึม ของ FZ	159
ฉ8 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลหน้าตัดแบบบางตัวอย่างคอนกรีตปรีซึม ของ MZ	159
ฉ9 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลหน้าตัดแบบบางตัวอย่างคอนกรีตปรีซึม ของ LZ	160
ข1 การวิเคราะห์หน้าตัดเคลือบและขัดตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตปรีซึม ด้วยกล้องออปโตดิจิทัลของ FZ (ก) แผนทีของหน้าตัดที่กำลังขยาย 100 เท่า (ข) บริเวณสนใจที่กำลังขยาย 750 เท่า (ค) ภาพ 3 มิติที่กำลังขยาย 750 เท่า (ง) ระดับความลึกของ (ค)	162

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข2 การวิเคราะห์หน้าตัดเคลือบและขัดตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตปรีซึม ด้วยกล้อง ออปโตดิจิทัลของ MZ (ก) แผนที่ของหน้าตัดที่กำลังขยาย 100 เท่า (ข) บริเวณ สนใจที่กำลังขยาย 750 เท่า (ค) ภาพ 3 มิติที่กำลังขยาย 750 เท่า (ง) ระดับ ความลึกของ (ค)	163
ข3 การวิเคราะห์หน้าตัดเคลือบและขัดตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตปรีซึม ด้วยกล้อง ออปโตดิจิทัลของ LZ (ก) แผนที่ของหน้าตัดที่กำลังขยาย 100 เท่า (ข) บริเวณ สนใจที่กำลังขยาย 750 เท่า (ค) ภาพ 3 มิติที่กำลังขยาย 750 เท่า (ง) ระดับ ความลึกของ (ค)	164
ข4 ภาพขยายบริเวณ ITZ (Interface zone) ซึ่งพบเจลจากชั้นตัวอย่างหน้าตัด เคลือบและขัดจากตัวอย่างคอนกรีตปรีซึม FZ ด้วยกล้องออปโตดิจิทัล ที่ กำลังขยาย (ก) 250 เท่า (ข) 1,000 เท่า (ค) 1,500 เท่า และ (ง) 3,000 เท่า	165
ข5 การวัดความลึกของการแตกหลุด (Pitting) ของเจลตัวอย่างคอนกรีตปรีซึมของ มวลรวม FZ	166
ข1 การวิเคราะห์โดยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการวิเคราะห์ด้วยรังสี เอกซ์ตัวอย่างคอนกรีตปรีซึม (ก) FZ (ข) MZ (ค) LZ	168

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

mol/l	= โมลต่อลิตร
mg/l	= มิลลิกรัมต่อลิตร
d	= วัน
%	= ร้อยละ
AAR	= ปฏิกิริยาระหว่างอัลคาไลกับมวลรวม (Alkali Aggregate Reaction)
ASR	= ปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (Alkali Silica Reaction)
ASR-gel	= แอลคาไลซิลิกาเจล
ACR	= ปฏิกิริยาอัลคาไลคาร์บอเนต (Alkali Carbonate Reactions)
FZ	= มวลรวมในแนวเขตรอยเลื่อน (Fault Zone)
MZ	= มวลรวมบริเวณขอบของเขตรอยเลื่อนที่มีควอตซ์ปะปน (Moderate Quartz Zone of Greywacke)
LZ	= มวลรวมหินแกรนิตส่วนใหญ่นอกเขตรอยเลื่อน (Large Zone of Greywacke)
NA	= ตัวอย่างคอนกรีตปรีซึมทดสอบด้วยวิธีเร่งการขยายตัวตามปกติ (Normal Accelerated)
CD3	= ตัวอย่างคอนกรีตปรีซึม ในสภาวะแพร่ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น ร้อยละ 3 (Chloride Diffusion in 3% NaCl solution)
CD6	= ตัวอย่างคอนกรีตปรีซึม ในสภาวะแพร่ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น ร้อยละ 6 (Chloride Diffusion in 6% NaCl solution)
CI3	= ตัวอย่างคอนกรีตปรีซึมทดสอบด้วยวิธีเร่งการขยายตัวโดยจุ่มใน สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 (Immerged in 3% NaCl solution)
CI6	= ตัวอย่างคอนกรีตปรีซึมทดสอบด้วยวิธีเร่งการขยายตัวโดยจุ่มใน สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 (Immerged in 6% NaCl solution)
XRD	= การหาค่าประกอบทางแร่ของมวลรวมด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction Analysis)
XRF	= การหาค่าประกอบออกไซด์ด้วยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

SEM	= การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)
ISE	= การวิเคราะห์ขั้วไฟฟ้าไอออน (Ion-Selective Electrodes Analysis)
ICP	= การวิเคราะห์พลาสมาเหนี่ยวนำคู่ควบ (Inductively coupled plasma)
RILEM	= Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux = สหภาพนานาชาติแห่งห้องปฏิบัติการและผู้เชี่ยวชาญในด้านวัสดุก่อสร้าง
ASTM	= American Society for Testing and Materials
CSA	= Canadian Standards Association

อิทธิพลของมวลรวมจากเขตรอยเลื่อน และคลอไรด์ ต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

Influence of Fault Zone Aggregates and Chloride on Alkali Silica Reaction

คำนำ

มวลรวม (Aggregate) เป็นองค์ประกอบส่วนหนึ่งของคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วต้องมีคุณสมบัติไม่ทำปฏิกิริยากับส่วนผสมซึ่งต่างจากซีเมนต์ที่ต้องการให้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเพื่อให้คอนกรีตแข็งตัวและมีกำลังตามที่ออกแบบ อย่างไรก็ตามในบางครั้งอาจเกิดปฏิกิริยาระหว่างมวลรวมและซีเมนต์ขึ้นได้ ในกรณีที่องค์ประกอบของปูนซีเมนต์มีปริมาณแอลคาไลที่หรือมีแอลคาไลจากสาเหตุอื่นๆ และมวลรวมที่ใช้ผสมมีซิลิกา (Silica) ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเป็นองค์ประกอบ ปฏิกิริยาเคมีนี้เรียกว่าปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (Alkali Silica Reaction, ASR) (Ferraris, 1995) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างแอลคาไลกับมวลรวม (Alkali Aggregate Reaction, AAR) แบบหนึ่งที่พบมากที่สุด (Sims and Poo, 2003) ผลที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานี้เป็นแอลคาไลซิลิกาเจล (ASR gel) ที่หากมีความชื้นจะดูดซับความชื้นและขยายตัวก่อให้เกิดแรงดันระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีต (Poole, 1992; Sims and Poo, 2003; Kawamura and Iwa, 2004) หากแรงดันนี้มีสูงกว่ากำลังที่คอนกรีตรับได้จะทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว เกิดปัญหาในด้านความคงทนและการใช้งานของโครงสร้างตลอดจนนำไปสู่การวิบัติขององค์อาคารคอนกรีตได้

ในปี พ.ศ. 2483 Stanton ได้รายงานการพบปัญหาเนื่องจากปฏิกิริยาแอลคาไลกับมวลรวมเป็นครั้งแรก (Stanton, 1940) หลังจากนั้นมีการสำรวจปัญหาการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาระหว่างแอลคาไลกับมวลรวมทั่วโลก (Crucq, 2005) แต่ในประเทศไทยก่อนปี พ.ศ. 2552 ยังไม่มีรายงานการพบกรณี ศึกษาของปฏิกิริยาระหว่างแอลคาไลกับมวลรวม และปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาอย่างเป็นทางการ (ปริญา และ ชัย, 2551) โดยทั่วไปแล้วในวงการก่อสร้างและนักวิจัยไทย มีความเชื่อว่ามวลรวมมีสถานะเฉื่อยต่อปฏิกิริยา (Inert Property) อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแหล่งมวลรวมในประเทศไทยที่ใช้ในงานก่อสร้างประมาณร้อยละ 15 มีแนวโน้มที่ทำปฏิกิริยากับแอลคาไลในปูนซีเมนต์ได้ เช่น หินแกรนิต หินบะซอลต์ หินฟิลาไลต์ หินไรโอไรท์ หินควอตซ์ และหินแกรนิต (กรมทรัพยากรธรณี, 2553) แต่ยังไม่มีการศึกษาที่จะอธิบายแนวโน้มที่จะปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาของแหล่งมวลรวมในประเทศไทยดังกล่าว ในขณะที่แหล่งหินในประเทศไทยมีอยู่อย่างจำกัด การใช้แหล่ง

หินที่ใช้เป็นวัตถุดิบในงานคอนกรีตอาจไม่ได้มีเพียงหินคุณภาพดีเท่านั้นทำให้มีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพของคอนกรีตจากปัญหานี้มากขึ้น ประกอบกับในปี พ.ศ. 2552 ได้มีรายงานยืนยันการพบปรากฏการณ์นี้เป็นครั้งแรกในประเทศไทย (ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2552; สุวิมล และคณะ, 2553; Sujjavanich, *et al.*, 2012) ดังนั้นการศึกษาในเรื่องปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาจำเป็นต้องได้รับความสนใจมากขึ้นโดยเฉพาะการศึกษาที่เกี่ยวกับข้อมูลท้องถิ่น

จากการศึกษาที่ผ่านมา การเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกามีลักษณะของความไม่แน่นอนในการเกิดปฏิกิริยาตามสัณฐานการกำเนิด เนื่องจากมีความแปรปรวนในลักษณะโครงสร้างผลึกของซิลิกาที่เป็นองค์ประกอบของหินเป็นตัวแปรสำคัญในการเกิดปฏิกิริยา (Ferraris, 1995) แต่ความแปรปรวนดังกล่าวยังไม่มียานวิจัยที่จะชี้ชัดถึงเหตุผลที่จะอธิบายความแตกต่างได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ อิทธิพลจากการกำเนิดของหินยังอาจเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งสำหรับปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาประเทศไทยมีลักษณะทางธรณีวิทยาที่มีความหลากหลายรวมถึงมีลักษณะเขตภูเขาไปเก่าในหลายบริเวณของประเทศ (กรมทรัพยากรธรณี, 2553) แหล่งหินอุตสาหกรรมจำนวนไม่น้อยที่เป็นหินชนิดอื่นนอกเหนือจากหินปูนและบางชนิดมีแนวโน้มที่จะเกิดปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้ (Swamy, 1992; Ferraris, 1995) ในกรณีของหินตะกอนโดยเฉพาะหินแกรนิตที่โครงสร้างอนุภาค (Microstructure) มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลอย่างมาก (Lu, 2002; Rivard, 2002) ซึ่งจำเป็นต้องทำให้การศึกษาให้เข้าใจในลักษณะเฉพาะในแต่ละท้องถิ่นเช่นกัน นอกจากนี้แหล่งหินบางแหล่งมีลักษณะการพาดผ่านของรอยเลื่อน (Fault Zone) ซึ่งเป็นผลของแรงที่เกิดจากกระบวนการแปรสัณฐานหรือกระบวนการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก (เพียต, 2552) การปรับสภาพโครงสร้างของหินเพื่อให้เกิดความสมดุลใหม่นี้ทำให้หินในบริเวณนี้มีลักษณะแตกต่างจากหินที่อยู่นอกเขตรอยเลื่อน ลักษณะที่เปลี่ยนไปนี้อาจทำให้หินที่อยู่ในเขตรอยเลื่อนมีพฤติกรรมแตกต่างจากหินที่อยู่นอกแนวเขตรอยเลื่อนและอาจตอบสนองต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาแตกต่างกันได้

นอกจากนี้ผลกระทบจากเพสซิมัม (Pessimism effect) ที่คอนกรีตมีแอลคาไลมากเกินไป มีมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ (Reactive aggregate) และมีสภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยาได้ ในบางสัดส่วนผสมกลับไม่เกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาเนื่องจากมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ มีปริมาณที่น้อยเกินไปหรือมากเกินไปในส่วนผสม (Crucq, 2005) ประเด็นนี้ก็ยังมีการศึกษาค้นคว้าจำกัดเช่นกัน

ในขณะที่ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกหลายตัวแปร ยังมีข้อโต้แย้งและยังมีการศึกษาเพื่ออธิบายความเชื่อมโยงกับปรากฏการณ์เหล่านี้น้อยมาก เช่น การเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในสภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์ ผลกระทบของปรากฏการณ์เพสซิมัม (Pessimism

effect) หรือปริมาณวิกฤตของวัสดุ เป็นต้น มีการศึกษาจำนวนหนึ่งที่เสนอว่าสภาวะที่มีคลอไรด์สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแอลคาไลในคอนกรีต (Chatterji *et al.*, 1987; Nixon *et.al*, 1988; Kawamura *et al.*, 1989; Kawamura *et al.*, 1994; Sibbick, 1993; Sibbick and Page, 1996; Kawamura and Takeuchi, 1996 และ Sacconi *et al.*, 2001) และบางกรณีพบการเพิ่มขึ้นของไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) (Shayan, 1998) ในขณะที่อีกกลุ่มกลับเสนอว่าสภาวะคลอไรด์ทำให้เกิดการลดลงของไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) และหน่วงปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (Kawamura and Igarashi 1990 และ Be'rube' *et al.*, 2003) ทั้งนี้ในงานวิจัยทั้งสองกลุ่มเป็นการศึกษาโดยมีค่าตัวแปรความเข้มข้นของคลอไรด์ที่จำกัด และยังไม่มีการศึกษาเงื่อนไขตัวแปรความเข้มข้นของคลอไรด์ภายใต้การแพร่ที่มีต่อปฏิกิริยาอัลคาไลน์ซิลิกาแต่อย่างใด ซึ่งสภาวะการแพร่นี้เป็นสภาวะแวดล้อมที่เกิดขึ้นเสมอในกรณีโครงสร้างชายทะเล ที่ประเทศไทยมีพื้นที่ชายฝั่ง ประมาณร้อยละ 6 ของประเทศ (ชายฝั่งทะเล พื้นที่ 20.54 ล้านไร่ จากพื้นที่ 321 ล้านไร่ ของประเทศ) ใน 24 จังหวัด รวมถึง 2 แขวง ของกรุงเทพมหานคร และนิคมอุตสาหกรรมภาคตะวันออกทั้งหมด (กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, 2553) สภาวะแวดล้อมคลอไรด์นี้จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาอีกเช่นกัน

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาอิทธิพลของมวลรวมในจากเขตรอยเลื่อนในแหล่งหิน ปราภูการณ์ เพสซิมัม และสภาวะแวดล้อมคลอไรด์ ที่มีต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา โดยผลจากการศึกษานี้จะให้ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาองค์ความรู้ในการเลือกใช้แหล่งหินที่มีความแปรปรวนจากตำแหน่งที่ตั้งอยู่ในแนวเขตรอยเลื่อน และสภาวะแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อปัญหาแอลคาไลซิลิกาในประเทศไทย

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาอิทธิพลของมวลรวมในและนอกเขตรอยเลื่อนที่มีต่อพฤติกรรมปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา
2. ศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เพสซิมัมของมวลรวมเกรย์แวกจากเขตรอยเลื่อน
3. ศึกษาผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่มีโซเดียมคลอไรด์ต่อการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาอิทธิพลของมวลรวมเกรย์แวก ในและนอกเขตรอยเลื่อนจากแหล่งหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยที่มีต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา โดยการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างมวลรวมในเขตรอยเลื่อน และนอกเขตรอยเลื่อน ดังนี้
 - 1.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีศิลาวรรณา (Petrographic Examination) โดยศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของมวลรวม ประกอบด้วยการหาค่าองค์ประกอบออกไซด์และองค์ประกอบทางแร่ของมวลรวม และการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล
 - 1.2 การศึกษาโดยวิธีแรงปฏิกิริยา ประกอบด้วย การทดสอบด้วยวิธีแรงปฏิกิริยา และการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลและออปโตดิจิทัล การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์
2. ศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เพสซิมัมในปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา โดยผันแปรสัดส่วนมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ต่อมวลรวมที่ไม่ทำปฏิกิริยา และผันแปรเข้มข้นของแอลคาไล ในการทดสอบการขยายตัวของแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์
3. ศึกษาผลกระทบของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกันด้วยการแปรและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โดยประกอบด้วยการทดสอบด้วยวิธีแรงปฏิกิริยาการขยายตัวของคอนกรีตปริซึม การวิเคราะห์ด้วยกล้องขยาย การวิเคราะห์ด้วยไฟฟ้าออสโน

การวิเคราะห์พลาสมาเหนี่ยวนำคู่ควบ การหาค่าประกอบด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์



การตรวจเอกสาร

เพื่อให้สามารถศึกษาได้บรรลุตามจุดมุ่งหมายจึงทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเด็น
ดังนี้

ปฏิกิริยาระหว่างแอลคาไลกับมวลรวม

กรณีศึกษาปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในต่างประเทศและในประเทศไทย

การแก้ปัญหาโครงสร้างที่เกิดปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

การทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

เขตรอยเลื่อนและพฤติกรรมของหินในเขตรอยเลื่อนที่มีต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

ผลกระทบจากเพสซิมัม

ผลกระทบของคลอไรด์ต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

ปฏิกิริยาระหว่างแอลคาไลกับมวลรวม

1. ความเป็นมาของปฏิกิริยาแอลคาไลกับมวลรวม

ในช่วงทศวรรษที่ 1920 ถึง 1930 ได้เกิดปัญหาโครงสร้างคอนกรีตในชายฝั่งแคลิฟอร์เนียระหว่าง Monterey Bay และ Los Angeles County รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกาจำนวนมากเกิดการแตกร้าวโดยไม่ทราบสาเหตุ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1940 Stanton ได้ค้นพบว่าการขยายตัวของคอนกรีตอาจเกิดขึ้นผ่านปฏิกิริยาเคมีระหว่างซีเมนต์และมวลรวมบางชนิดเช่น หินเชล (shales) เชิร์ต (cherts) และหินปูน (Stanton, 1940) ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งเป็นภาพของ Stanton และโครงสร้างคอนกรีตที่ค้นพบปฏิกิริยาระหว่างแอลคาไลกับมวลรวมครั้งแรก

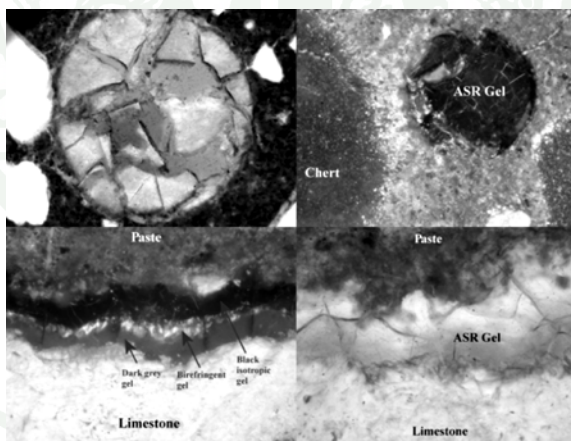
ปฏิกิริยาแอลคาไลมวลรวมเป็นปฏิกิริยาแบบหนึ่งที่เกิดกับคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วโดยเกิดที่ผิวสัมผัสระหว่างซีเมนต์และมวลรวมซึ่งต้องมีลักษณะทางแร่ที่เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาในขณะที่ซีเมนต์ต้องมีปริมาณแอลคาไลมากพอ (Sims and Nixon, 2003) ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยานี้เป็นแอลคาไลซิลิกาเจล ที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าเมทริกซ์ของคอนกรีตและสามารถขยายตัวโดยการดูดซับความชื้นจากสภาพแวดล้อมก่อให้เกิดแรงดันจากการขยายตัวการเสื่อมสภาพและเป็นสาเหตุทำให้

โครงสร้างคอนกรีตวิบัติได้ (Poole, 1992) ภาพที่ 2 แสดงการแตกร้าวระดับอนุภาค (Microcrack) ในปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาที่ก่อให้เกิดเจลขึ้นภายใน (Jana, 2008)



ภาพที่ 1 Stanton และโครงสร้างสะพานคอนกรีตที่พบปฏิกิริยาแอลคาไลกับมวลรวมครั้งแรก

ที่มา: Federal Highway Administration (2011)



ภาพที่ 2 การแตกร้าวระดับอนุภาค (Microcrack) ในคอนกรีตที่เกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

ที่มา: Jana (2008)

2. ชนิดของปฏิกิริยาแอลคาไลกับมวลรวม

ปฏิกิริยาแอลคาไลกับมวลรวมมี 2 ชนิด (Poole, 1992) ดังนี้

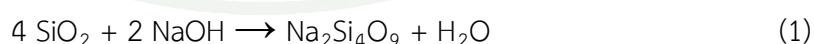
ปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (Alkali Silica Reactions, ASR) เกิดจากสารประกอบแอลคาไล ซึ่งเป็นองค์ประกอบปูนซีเมนต์ ทำปฏิกิริยากับซิลิกาที่เป็นองค์ประกอบหลักของมวลรวมบางลักษณะ (Poole, 1992 และ Ferraris, 1995) เป็นปฏิกิริยาแอลคาไลมวลรวมชนิดที่พบมากที่สุดและเกิดขึ้นทั่วโลก และงานวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาแอลคาไลมวลรวมส่วนใหญ่จะเป็นปฏิกิริยาชนิดนี้

ปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอเนต (Alkali Carbonate Reactions, ACR) ค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1957 (Swenson, 1957) เป็นปฏิกิริยาระหว่างแอลคาไลในปูนซีเมนต์ และแร่คาร์บอเนตในมวลรวมบางประเภท และมีรายงานการพบได้ค่อนข้างน้อยมาก (Poole, 1992) โดยส่วนใหญ่มีรายงานการพบในแคนาดา สหรัฐอเมริกา และจีน (Tang *et al.*, 1996)

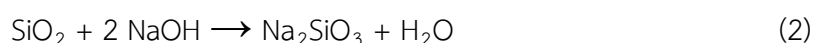
3. กลไกของการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลมวลรวม

3.1 กลไกของการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

ปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาเป็นกระบวนการทางเคมีระหว่างสารประกอบออกไซด์ของธาตุแอลคาไล ได้แก่ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ในปูนซีเมนต์ และซิลิกา (SiO_2) บางลักษณะในมวลรวม สัดส่วนขององค์ประกอบในสมการยังมีความแปรปรวนและยังไม่มีข้อสรุป แต่พออธิบายได้ดังนี้ (Poole, 1992; Helmuth, *et al.*, 1993; Thomas and Follard, 2007; Crucq, 2005)



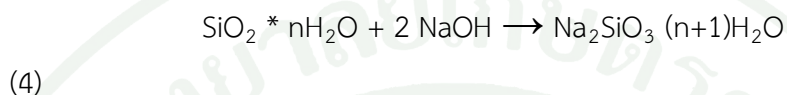
และ



หรืออีกสมการ



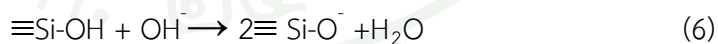
และ



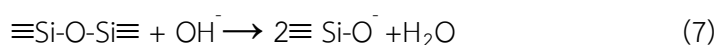
ในขณะที่ Helmuth *et al.* (1993) ให้ความสำคัญกับสมการของไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ที่เกิดจากองค์ประกอบในปูนซีเมนต์โดยสมการเชิงประจักษ์ (Empirical Equation) (Helmuth *et al.*, 1993) ดังนี้

$$[\text{OH}^-] = 0.339(\text{Na}_2\text{Oe})/(\text{w/c}) + 0.022 \pm 0.06 \quad (5)$$

โดยที่ OH^- เป็นปริมาณไฮดรอกซิลไอออน (มีหน่วยเป็น mol/l) ในสารละลายในช่องว่าง Na_2Oe คือปริมาณโซเดียมออกไซด์เทียบเท่า (equivalent sodium content) หาได้จาก $\text{Na}_2\text{Oe} = \text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{K}_2\text{O}$ โดย Na_2O คือปริมาณโซเดียมออกไซด์ และ K_2O คือปริมาณโพแทสเซียมออกไซด์ และ 0.658 เป็นค่าการแปลงหน่วย (Conversion Factor) ที่มาจากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักโมเลกุลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ และ w/c คืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จากปริมาณไฮดรอกซิลไอออน Dent Glasser และ Kataoka (1981) ได้เสนอสมการปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกซิลไอออนจากช่องว่างที่มีน้ำของคอนกรีต (Pore solution) และซิลิกา ดังนี้ (Thomas, and Follard. 2007)

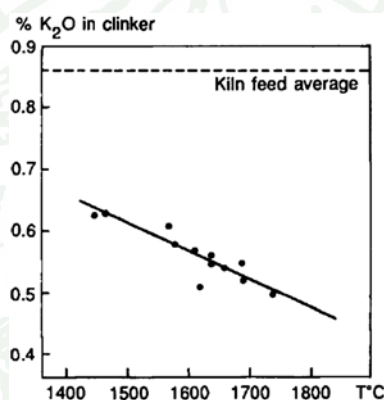


และไฮดรอกซิลไอออนจากภายนอกที่ซึมผ่านเข้ามาในโครงสร้างก่อให้เกิดแอลคาไลซิลิกาเจลเพิ่มขึ้น ดังนี้



ปัจจัยที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ประกอบด้วย

1. ปริมาณแอลคาไลในปูนซีเมนต์ ได้แก่ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ซึ่งเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เสมอแต่ปริมาณขึ้นอยู่กับส่วนผสมและอุณหภูมิในการเผา (Worning and Johansen, 1983) โดยสามารถคำนวณให้อยู่ในรูปของโซเดียมออกไซด์เทียบเท่า (Equivalent Sodium Oxide) ภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้นเม็ดปูน (Clinker) ที่ได้จากการผลิตจะมีปริมาณโพแทสเซียมออกไซด์ลดลง ในขณะที่หากอุณหภูมิสูงไม่เพียงพอจะทำให้มีปริมาณโพแทสเซียมออกไซด์สูง

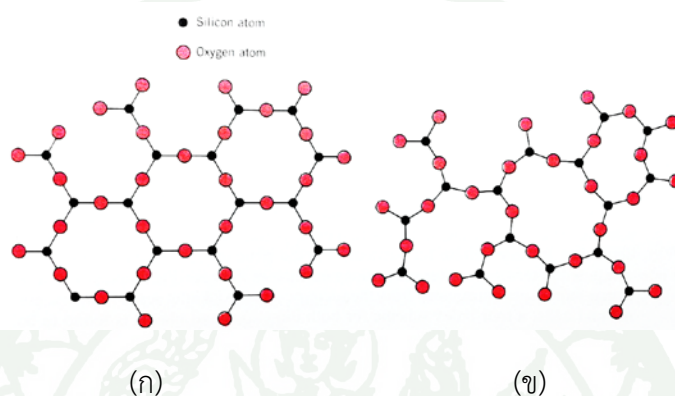


ภาพที่ 3 ปริมาณโพแทสเซียมออกไซด์ในเม็ดปูน ณ อุณหภูมิเฉลี่ยต่างๆกันในการเผา

ที่มา: Worning and Johansen (1983)

2. ซิลิกาที่ทำปฏิกิริยาได้ในมวลรวม (Reactive Silica in Aggregate) ในมวลรวมต้องมีองค์ประกอบที่ทำปฏิกิริยาได้ ในที่นี้คือซิลิกาที่ทำปฏิกิริยาได้ ก่อนหน้านี้นักวิจัยเชื่อว่าหินไม่กี่ชนิดเท่านั้นที่ทำปฏิกิริยาแอลคาไลมวลรวมได้ เช่น โอปอล เซิร์ท คาลซีโดเนีย และหินกลุ่มแก้วภูเขาไฟ แต่ในปัจจุบันพบการเกิดปฏิกิริยาในหินชนิดอื่นที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ ซึ่งความแปรปรวนของการเกิดนี้ขึ้นอยู่กับสถานะของซิลิกาในหินนั้นๆ (American Concrete Institute, 1998) หากซิลิกาอยู่ในสถานะที่เป็นผลึกโดยสมบูรณ์ (Well Crystallized) ดังแสดงใน ภาพที่ 4 (ก) ซึ่งการที่ไฮดรอกซิลไอออนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับซิลิกาในมวลรวมนั้นไม่ได้หรือทำได้ยาก แต่หากโครงสร้างแร่หรืออนุภาคมวลรวมนั้นมีความแปรปรวนอยู่ในสถานะที่เป็นผลึกไม่สมบูรณ์ (Poorly Crystallized) หรืออสัณฐาน (Amorphous) (ดังแสดงใน ภาพที่ 4 ข) ไฮดรอกซิลไอออนจะทำลายที่บริเวณผิวของซิลิกา

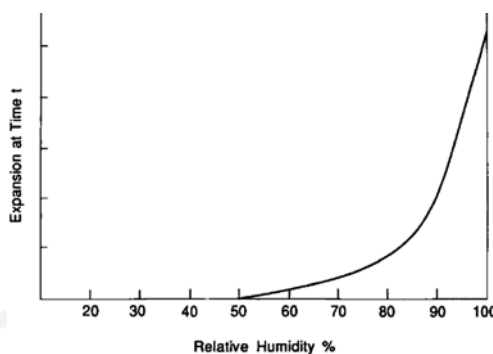
ในตำแหน่งที่มีพันธะอ่อนแอในโครงสร้างของมวลรวม ซึ่งทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของโครงข่ายซิลิกา เกิดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างแอลคาไลไอออน (Na^+ และ K^+) และไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ได้ ผลลัพธ์ของปฏิกิริยาที่มีลักษณะคล้ายเจล ที่เรียกว่าแอลคาไลซิลิกาเจล (ASR-Gel) (Ferraris et.al., 1997)



ภาพที่ 4 โครงสร้างของซิลิคอนไดออกไซด์ที่ (ก) สถานะผลึกโดยสมบูรณ์ และ (ข) สถานะผลึกไม่สมบูรณ์

ที่มา: Callister (1994)

3. ความชื้นในสภาวะแวดล้อม เนื่องจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาต้องมีไฮดรอกซิลไอออนและแอลคาไลในปูนซีเมนต์เพื่อให้เกิดเป็นแอลคาไลไอออน จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าภายในคอนกรีตต้องมีความชื้นสัมพัทธ์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80 จึงจะเกิดปฏิกิริยาและการขยายตัว (American Concrete Institute, 1998) ดังแสดงในภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัวของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาที่ระดับความชื้นต่างกันซึ่งความสำคัญของความชื้นนี้ ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) มีผลต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาด้วยเช่นกันเนื่องจากคอนกรีตปกติที่มี w/c ค่อนข้างสูงมักจะมีน้ำส่วนหนึ่งที่ค้างอยู่ในช่องว่างในเนื้อคอนกรีตตลอดอายุการใช้งานยกเว้นโครงสร้างที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมแห้งมากๆ หรือใช้คอนกรีตที่มี w/c ต่ำมากๆ และในหลายกรณีที่โครงสร้างคอนกรีตได้รับความชื้นตลอดเวลา เช่น พื้นหรือถนนที่วางบนดิน เสาดม่อ ฐานราก โครงสร้างเหล่านี้มีแนวโน้มว่าจะเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกามากกว่าองค์ประกอบของปฏิกิริยาจะถูกใช้จนหมด



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัวของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาและระดับความชื้นสัมพัทธ์

ที่มา: Swamy (1992)

4. อุณหภูมิ จากการศึกษที่ผ่านมาพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาจะเพิ่มขึ้น (American Concrete Institute, 1998) ในสภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิสูงจึงยังต้องให้ความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาเพื่อป้องกันปัญหานี้

ชนิดของหินที่ทำปฏิกิริยาได้ในปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

มวลรวมเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นและมีอยู่ตามธรรมชาติโดยส่วนใหญ่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นคุณสมบัติของมวลรวมจึงขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด ทำให้มีความหลากหลายและแปรปรวนได้มาก ซึ่งเป็นปัญหาสำหรับปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา มวลรวมต่างแหล่งที่มาจะมีเงื่อนไขและระดับการตอบสนองต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาต่างกัน โดยทั่วไปแล้วหินที่มีการตอบสนองต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกามักมีซิลิกาที่ไวต่อปฏิกิริยาเป็นองค์ประกอบ (Sims and Nixon, 2003) อย่างไรก็ตามวัสดุที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ (Silicious Material) ที่สนองตอบต่อปฏิกิริยามีเพียงบางส่วนเท่านั้น อาจเป็นไปได้ว่า การตอบสนองต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ซิลิกาในมวลรวมต้องมีสถานะเป็นซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica) หรือ ผลึกอย่างอ่อน (Poorly Crystalline) วัสดุในธรรมชาติที่มีแนวโน้มการตอบสนองต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วัสดุในธรรมชาติบางชนิดที่มีแนวโน้มการตอบสนองต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในคอนกรีต

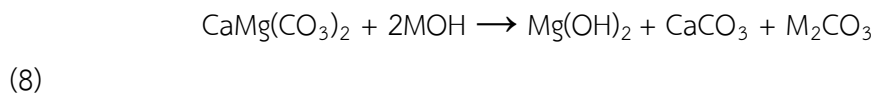
แร่ธาตุ	ความเห็น
โอพอลไลน์ซิลิกา (Opaline Silica)	ตอบสนองต่อปฏิกิริยาเสมอ และเกิดขึ้นทั้งในองค์ประกอบหลักและองค์ประกอบรองของหิน
แคลซีโดนีย์ (Chalcedony)	ตอบสนองต่อปฏิกิริยาพอสมควร เกิดขึ้นในองค์ประกอบหลักของหินเชิร์ต (Chert) และหินเหล็กไฟ (Flint)
หินภูเขาไฟ (Volcanic Glass)	ตอบสนองต่อปฏิกิริยาในบางกรณี เกิดขึ้นในองค์ประกอบทั่วไปของหินภูเขาไฟเม็ดละเอียด เช่น หินบะซอลต์ และหินไรโอไรท์
หินที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ (Silicious Cement) หรือหินผลึกควอร์ต (Cryptocrystalline Quartz)	ยังไม่สามารถระบุชัดเจนได้ในขณะนี้ เกิดในหินหรือวัสดุบางส่วนที่มีผิวเป็นร่องเล็ก (Grain) เช่น หินเกรย์แวค (Greywacke) และ หินฮอร์นเฟล (Hornfel)

ที่มา: Swamy (1992)

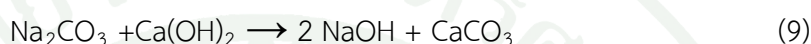
3.2 กลไกของการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอเนต

เป็นปฏิกิริยาระหว่างแอลคาไลในปูนซีเมนต์ และแร่คาร์บอเนตในมวลรวมซึ่งมีการพบครั้งแรกที่ ออนตาริโอ แคนาดา ในปี ค.ศ. 1957 โดย Swenson จากผลการศึกษาที่ผ่านมาที่ผ่านมามีมาพบว่าเกิดการขยายตัวและหน่วยแรงเกิดขึ้นภายในคอนกรีตเช่นเดียวกันกับปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (American Concrete Institute, 1998) ภาพที่ 6 แสดงตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอเนต

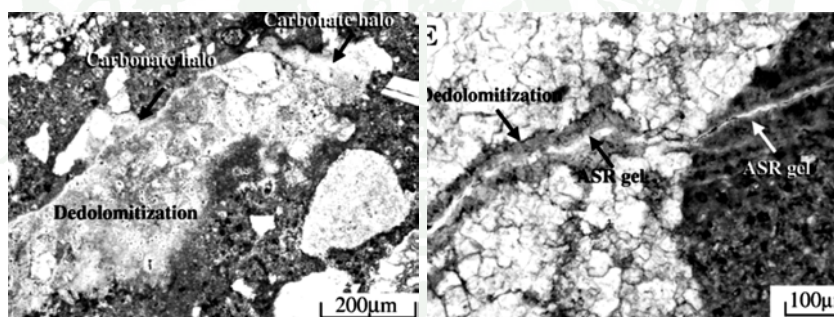
สมการเคมีในการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอเนตเกิดขึ้นจากการแปรสภาพของแร่โดโลไมต์ (Dolomite, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) หรือเรียกว่า “ปฏิกิริยาโดโลไมต์” (Dedolomitization reaction) เกิดเป็นแคลไซต์ (Calcite, (CaCO_3)) และ บรูไซต์ (Brucite, $\text{Mg}(\text{OH})_2$) โดยอาจจะเกิดขึ้นในหิน Dolostone หรือ Dolomitic limestone และบางครั้งอาจพบร่วมกับปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา สมการสามารถแสดงได้ดังนี้



โดยที่ M คือ สารแอลคาไล ในที่นี้คือ โพแทสเซียม โซเดียม หรือ ลิเทียม ปฏิกิริยาเคมีที่ตามมาคือแอลคาไลคาร์บอเนต (M_2CO_3) ที่เป็นผลผลิตอาจทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นแอลคาไลไฮดรอกไซด์ซ้ำอีกครั้งหนึ่ง เช่น



การเกิดปฏิกิริยานี้ยังไม่เป็นที่เข้าใจได้ทั้งหมด และปฏิกิริยาอัลคาไลคาร์บอเนตยังมีพฤติกรรมที่แตกต่างจากปฏิกิริยาแอลคาไลมวลรวม เช่น ไม่พบการไหลออกของแอลคาไลเจล ไม่มีปรากฏการณ์เพสซิมัม การขยายตัวมีค่ามากขึ้นหากมวลรวมมีขนาดใหญ่ขึ้น สารปอซโซลานและสารเคมีหลายชนิด ไม่สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอเนตได้ เป็นต้น (Katayama *et al.*, 2004)



(ก)

(ข)

ภาพที่ 6 การเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอเนต (ก) การเกิดปฏิกิริยาโดโลไมต์ในหิน Dolostone ก่อนให้เกิดหลุมคาร์บอเนตโดยไม่เกิดการแตกร้าว (ข) การเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอเนต ร่วมกับปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

ที่มา: Katayama (2010)

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอเนต ในหินคาร์บอเนตที่ไม่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบอาจเกิดจากการไม่เสถียรภาพของแร่คาร์บอเนตและทำให้เกิดการ Dedolomitization จากการศึกษาก่อน Katayama พบว่าการเกิดปฏิกิริยาในคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีแอลคาไล ขึ้นอยู่กับขนาดเม็ดเกรน (Grain Size) ของแร่ และปริมาณสัมพัทธ์ (Stoichiometry) ของโดโลไมท์ และในบางกรณีปฏิกิริยาแอลคาไลรวมในหินคาร์บอเนต อาจเป็นปฏิกิริยาร่วมกันระหว่างปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา และ Dedolomitization ได้ ทั้งนี้อาจใช้วิธีพิจารณาเพื่อคาดการณ์การเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลรวมในหินคาร์บอเนตได้โดยการใช้เงื่อนไขของความไม่เสถียรภาพของแร่จากขนาดของผลึกและลักษณะของผลึก ปริมาณของ Dedolomitization และปริมาณของ Dolomitization

RILEM AAR1 ได้จำแนกระดับความเสี่ยงของการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอเนตตามประเภทหรือกลุ่มหินไว้ 3 ระดับคือ ระดับ I ไม่ทำปฏิกิริยา ระดับ II มีแนวโน้มเกิดปฏิกิริยา และระดับ III ทำปฏิกิริยาได้หรือมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระดับความเสี่ยงต่อปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอเนต

ระดับ	การเกิดปฏิกิริยา	ชนิดหิน
I	ไม่เกิดปฏิกิริยา	Limestone Dolostone with calcitic cement Dolostone
II	มีแนวโน้มเกิดปฏิกิริยา	Calcitic dolostone with partial dedolomitization. Dolomitic limestone with partial dolomitization Limestone and marly limestone with chert
III	ทำปฏิกิริยาได้ (เป็นไปได้ที่จะเกิดปฏิกิริยา)	Type II+clay-rich content Type II+micro- and crypto-crystalline quartz Type II+microcrystalline dolostone Silicified marly limestone

ที่มา: Lopez-Buendia *et al.* (2006)

กรณีศึกษาปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในต่างประเทศและในประเทศไทย

1. กรณีศึกษาปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในต่างประเทศ

ปัญหาการเสื่อมสภาพของคอนกรีตที่เกิดจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้มีผลกระทบในวงกว้างทั่วโลก หลังการค้นพบของ Stanton ได้มีรายงานการเกิดขึ้นจากหลายๆประเทศทั่วโลกดังแสดงในภาพที่ 7 อย่างไรก็ตามรายงานที่พบเหล่านี้ยังถือว่าไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนโครงสร้างสร้างคอนกรีตทั้งหมดที่มี ส่วนหนึ่งอาจเป็นเพราะปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาต้องใช้เวลาจนถึงจะเกิดขึ้น ในบางรายงานพบว่าได้มีการพบปัญหาหลังจากที่ได้ก่อสร้างมาแล้วเป็นเวลา 25-40 ปี (Poole, 1992) นั่นคือการพบปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในโครงสร้างมักจะสังเกตเห็นได้เมื่อโครงสร้างมีอายุมากกว่า 10 ปีขึ้นไป

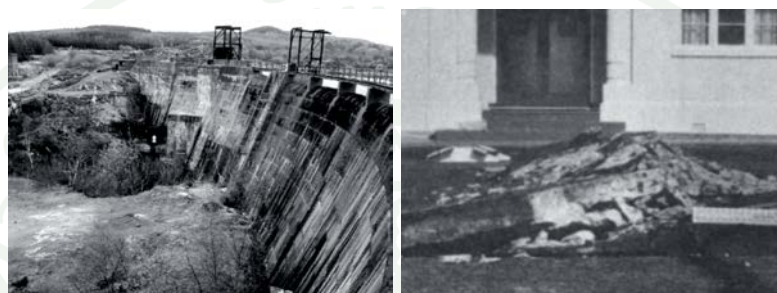


ภาพที่ 7 รายงานการเกิดปัญหาปฏิกิริยาระหว่างแอลคาไลซิลิกาในประเทศต่างๆ

ที่มา: Poole (1992)

ประเทศที่ได้ค้นพบปัญหานี้ต่างมีความตื่นตัวเพื่อป้องกันความเสี่ยงที่จะเกิดปัญหาที่จะเกิดขึ้นนี้ ทั้งในเรื่องการเลือกใช้แหล่งมวลรวม และการควบคุมปริมาณแอลคาไลในปูนซีเมนต์ ประเทศไทยซึ่งยังอยู่ในระหว่างการเริ่มต้นศึกษาก็มีความจำเป็นเช่นเดียวกัน ภาพที่ 8 แสดงกรณีศึกษาของโครงสร้างที่เกิดปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในต่างประเทศๆ ในภูมิภาคทวีปเอเชียก็มีรายงานการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาเผยแพร่อย่างต่อเนื่อง ประเทศญี่ปุ่นที่ได้ค้นพบกรณีศึกษาของปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาครั้งแรกในปี ค.ศ. 1983 (Nishibayashi et al., 1992) เช่นเดียว

กันกับที่ประเทศจีน ฮองกง และอินเดีย (Xiang-yin et al., 2003; Chak and Chan, 2005) ส่วนที่ มาเลเซียก็มีนักวิจัยพยายามศึกษาความเสี่ยงที่จะเกิดปัญหา ปฏิกริยาแอลคาไลซิลิกาโดยการสำรวจ ภาคสนามและเก็บตัวอย่างหิน แต่เบื้องต้นก็พบเพียงรอยแตกกร้าวแบบสุ่ม (Random map cracking) ในโครงสร้างโดยยังไม่มีรายงานอย่างเป็นทางการแต่อย่างใด (Razak and Yaakob, 1991) กรณีศึกษาในภูมิภาคเอเชียแสดงในภาพที่ 9



(ก)

(ข)



(ค)

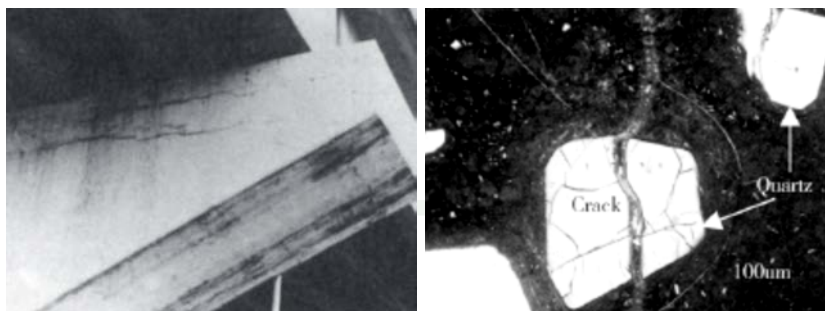
(ง)

ภาพที่ 8 กรณีศึกษาของโครงสร้างที่เกิดปัญหาปฏิกริยาแอลคาไลซิลิกาในประเทศต่างๆ

(ก) ปฏิกริยาแอลคาไลซิลิกาที่เกิดกับของเขื่อน Maentwong เวลล์ สหราชอาณาจักร

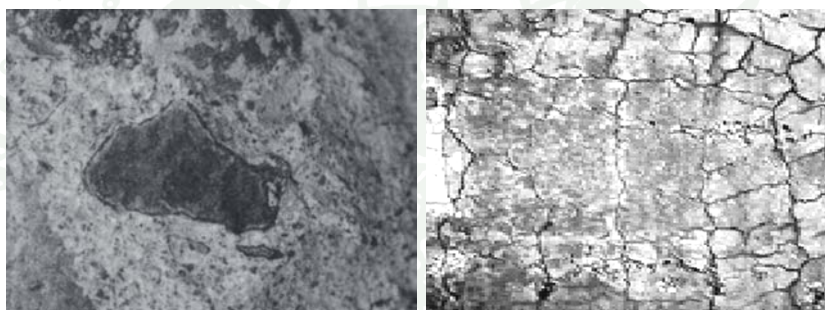
(ข) ความเสียหายที่เกิดกับผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กในนิวซีแลนด์ (ค) คราบขาวและปรากฏการณ์ efflorescence ของ ASR-Gel ในฐานรากของสะพาน อายุ 25 ปี ในสหรัฐอเมริกา (ง) รอยแตกกร้าวในแนวพื้นตอม่อและฐานรากของสะพานอายุ 20 ปี ในสหรัฐอเมริกา

ที่มา: (ก) Sims and Poo (2003); (ข) ST. John (1992) (ค) (ง) Fournier *et al.*, (2010)



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

ภาพที่ 9 กรณีศึกษาของปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในภูมิภาคทวีปเอเชีย (ก) โครงสร้างเสารูปตัว T ในประเทศญี่ปุ่น (ข) รอยแตกร้าวผ่านมวลรวมจากการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาของมวลรวมจากประเทศจีน (ค) ขอบปฏิกิริยาสีดำรอบมวลรวมที่เกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาจากชิ้นส่วนคอนกรีตในประเทศอินเดีย (ง) รอยแตกร้าวแบบแผนที่บนสะพาน Pontian ในประเทศมาเลเซีย

ที่มา: (ก) Nishibayashi *et al.* (1992) (ข) Xiang-yin *et al.* (2003) (ค) Mullick (1992)
(ง) Razak and Yaakob (1991)

เนื่องจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาเกิดในสภาพแวดล้อมที่ต้องมีความชื้นเป็นองค์ประกอบสำคัญทำให้โครงสร้างคอนกรีตที่พบปัญหาจึงเป็นโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง เช่น เขื่อน สะพาน ถังเก็บน้ำคอนกรีต กำแพงกันดิน ซึ่งล้วนเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ที่หากมีปัญหาก็ส่งผลกระทบต่อส่วนรวม ความรู้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาจึงมี

ความสำคัญ เนื่องจากที่ผ่านมามีปัญหาโครงสร้างเหล่านี้ล้นซ่อมแซมได้ยาก หรือไม่สามารรถซ่อมแซมได้ จนมีรายงานการทำลายโครงสร้างเหล่านี้ในหลายๆประเทศเช่น เยอรมนี เนเธอร์แลนด์ สหรัฐอเมริกา และอังกฤษ (Chak and Chan, 2005; Copuroglu and Einarsson, 2011; Oakland Macomb Interceptor Drain, 2012) ดังแสดงในภาพที่ 10 และภาพที่ 11



ภาพที่ 10 รอยแตกร้าวและคราบขาวที่พบในสะพาน Schoonhoven ในประเทศเนเธอร์แลนด์ที่พบปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

ที่มา: Copuroglu and Einarsson (2011)

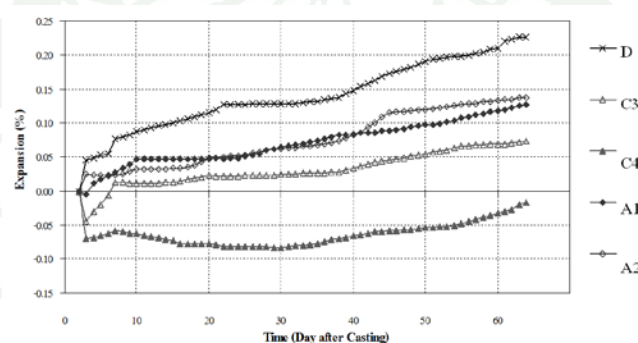


ภาพที่ 11 รอยแตกร้าวที่พบในราวสะพานข้ามแม่น้ำ Red Run สหรัฐอเมริกา จากปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาและการแก้ไข

ที่มา: Oakland Macomb Interceptor Drain (2012)

2. กรณีศึกษาปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในประเทศไทย

ก่อนหน้านี้ ในประเทศไทยยังไม่มีรายงานการพบกรณีศึกษาของปฏิกิริยาระหว่างแอลคาไลกับมวลรวม และปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาอย่างเป็นทางการ (ปริญญญา และชัย, 2551) แต่หลังจากปี พ.ศ. 2552 ได้มีการยืนยันปรากฏการณ์นี้ในโครงสร้างเผยแพร่ออกมาเป็นครั้งแรกโดยพบการขยายตัวของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาและการแตกร้าวของโครงสร้างจริง การขยายตัวของแท่งตัวอย่างที่ตัดมาจากชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเจาะมาจากโครงสร้างแสดงในภาพที่ 12 พบว่าตัวอย่างคอนกรีตหลังการเจาะและทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการยังมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 12 การขยายตัวของตัวอย่างภายใต้การเร่งการขยายตัวจากกรณีศึกษาในประเทศ

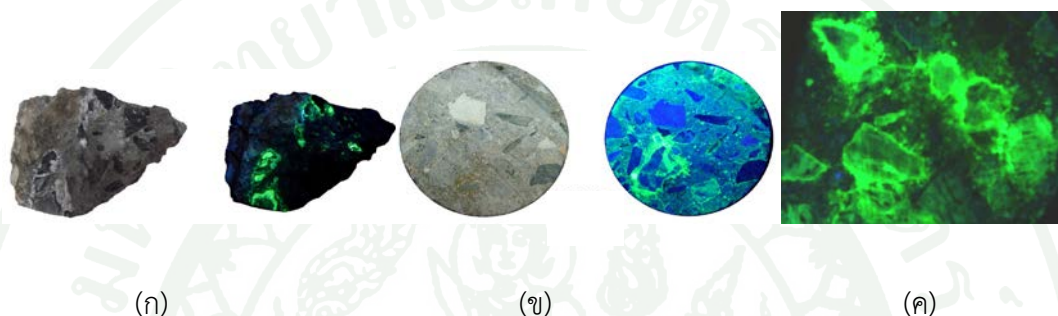
ที่มา: สุวิมล และคณะ (2553)



ภาพที่ 13 ตัวอย่างคอนกรีตเจาะแสดงรอยแตกร้าว ที่เกิดจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาจากกรณีศึกษาในประเทศ

ที่มา: Sujjavanich (2011)

ส่วนภาพที่ 13 แสดงรอยแตกร้าวและการเกิดขอบของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาอย่างชัดเจน และนอกไปจากนี้ยังพบการเรืองแสงจากการใช้สารละลาย Uranyl acetate ภายใตแสงอุลตราไวโอเลตดังแสดงในภาพที่ 14 (ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2552, สุวิมล และคณะ 2553, Sujjavanich *et al.*, 2012) จากการศึกษาเหล่านี้ยืนยันว่ามีการเกิดปัญหาเนื่องจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้เกิดขึ้นในประเทศไทยแล้ว



ภาพที่ 14 การสะท้อนแสงของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการพ่นด้วย Uranyl Acetate ด้านซ้ายภายใต้แสงธรรมชาติ และด้านขวาภายใต้แสง อุลตราไวโอเลต (ก) จากชิ้นส่วนโครงสร้างจริงที่แตกร้าวจนหลุดร่อน (ข) และ (ค) จากแท่งตัวอย่างที่ตัดมาจากตัวอย่างคอนกรีตเจาะจากโครงสร้างเดียวกัน

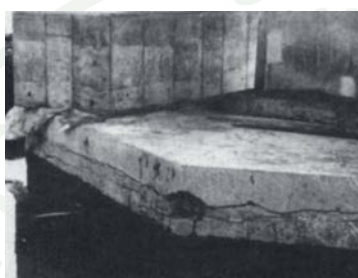
ที่มา: (ก) และ (ข) Sujjavanich *et al.* (2012) (ค) สุวิมล และคณะ (2553)

การแก้ปัญหาโครงสร้างที่เกิดปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

ที่ผ่านมาได้มีความพยายามแก้ปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา แต่อุปสรรคสำคัญสำหรับโครงสร้างที่เกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาคือเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างมวลรวมและส่วนผสมภายในโครงสร้างเอง หากอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีปัญหาต่อไปจะไม่สามารถป้องกันได้เนื่องจากปฏิกิริยายังคงอยู่ต่อไป ตัวอย่างวิธีการซ่อมแซมได้แก่

1. การเสริมโครงสร้าง

ในกรณีของสะพาน Marsh Mills Viaducts, Plymouth ประเทศอังกฤษ ที่เกิดปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาที่ฐานรากทำให้รอยร้าวทั่วไปโดยส่วนใหญ่พบรอยร้าวขนาดใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณใกล้กับระดับน้ำ การแก้ปัญหาทำโดยใช้การพุงคานด้วยโครงสร้างเหล็กเพื่อช่วยรับน้ำหนักแต่หลังจากนั้นก็มีการเสื่อมสภาพอย่างต่อเนื่อง สุดท้ายก็เกิดปัญหาการสั่นไหวขณะใช้งาน หกปีหลังจากนั้นก็ต้องทุบทิ้งและสร้างใหม่ในที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 15



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

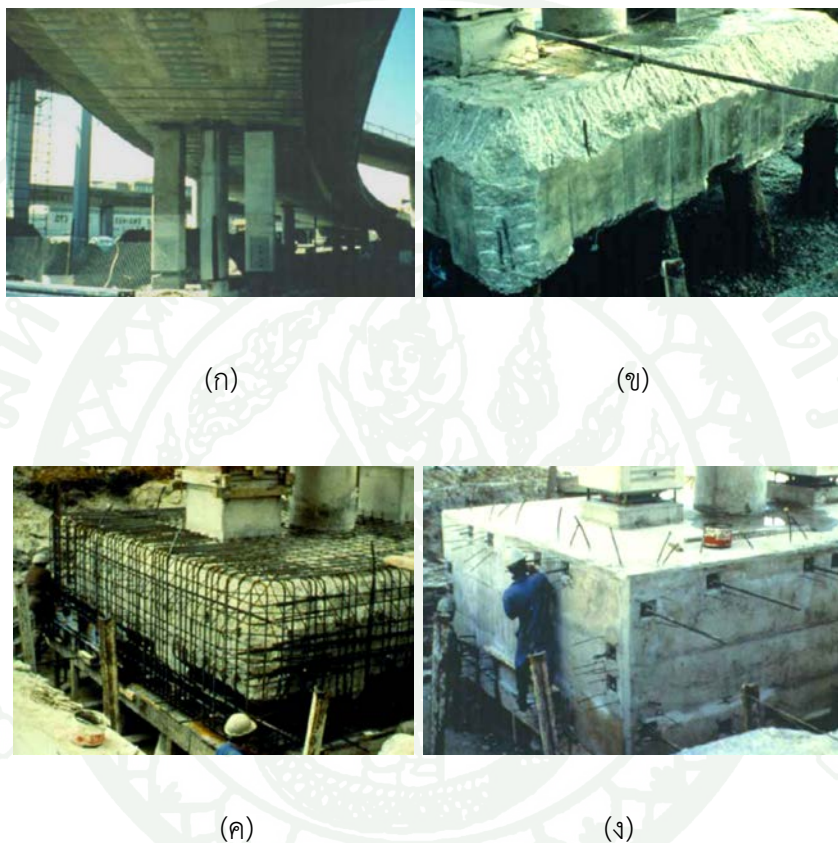
ภาพที่ 15 สะพาน Marsh Mills Viaducts ในประเทศอังกฤษ (ก) พบรอยร้าวทั่วไปที่ฐาน (ข) การค้ำยันเสาตอม่อที่ด้วยโครงสร้างเหล็กเพื่อช่วยในการรับน้ำหนักชั่วคราวและ (ค) ทุบทิ้ง และ (ง) สร้างใหม่

ที่มา: (ก) และ (ข) Sims and Sotiropoulos (1989), (ค) และ (ง) Jones (1995)

2. การใช้ระบบคอนกรีตอัดแรง

เป็นอีกวิธีที่ได้ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาเพื่อช่วยในการรับแรงจากการขยายตัวของโครงสร้างอย่างไรก็ตามเนื่องจากเป็นการเสริมกำลังภายนอกไม่ได้ยุติการเกิดปฏิกิริยาทำ

ให้มีข้อจำกัดในกรณีที่โครงสร้างขนาดใหญ่ที่มีหน่วยแรงจากการขยายตัวจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาสูงเกินกว่าระบบคอนกรีตอัดแรงจะทำงานได้ (Rotter 1995, Canadian Standards Association, 2000) ภาพที่ 16 แสดงการเสริมกำลังโครงสร้างของโครงสร้างคอนกรีตที่เกิดปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาที่แอฟริกาใต้



ภาพที่ 16 การเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตที่เกิดปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในแอฟริกาใต้ (ก) โครงสร้างโดยรวม (ข) การสกัดรอยแตกกว้างในตอม่อ (ค) การเสริมเหล็กเพิ่ม (ง) การเสริมกำลังภายนอกเพิ่มด้วยวิธีอัดแรงหลังจากเทคอนกรีตทับ

ที่มา: Fournier *et al.* (2010)

3. วิธีการฉีดอีพอกซี

การฉีดอีพอกซี (Epoxy resin injection) การศึกษาการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตที่เกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาโดยวิธีการฉีดอีพอกซีดังแสดงในภาพที่ 17 พบว่าความลึกของอีพอกซี

ที่ซึมเข้าไปได้ในรอยร้าวพบว่าต้องมีขนาดความกว้างของรอยร้าวไม่ต่ำกว่า 0.3 มิลลิเมตรอีพอกซีจึงจะซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้และยังมีข้อจำกัดในระดับความลึกที่จะฉีดอัดเข้าไปได้ (Vicrods, 2008)



(ก)

(ข)

ภาพที่ 17 (ก) การซ่อมแซมโครงสร้างที่เกิดปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาโดยการฉีดอัดอีพอกซี

(ข) คอนกรีตที่เจาะเพื่อตรวจสอบความลึกของอีพอกซีที่ซึมเข้าไปได้ในรอยร้าว

ที่มา: Vicrods (2008)

4 การใช้สารละลายผลสมลิเทียม

การใช้สารละลายผลสมลิเทียม (Lithium compounds) มีรายงานจากการทดลองในห้องปฏิบัติการที่พบว่าสารละลายลิเทียม สามารถลดปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้แต่ในงานจริงยังมีการศึกษาน้อยมาก ในความเป็นจริงแล้วสารละลายมีการซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ไม่มากนัก จากการศึกษาที่รัฐโอไฮโอ สหรัฐอเมริกา ในภาพที่ 18 พบว่าสารละลายลิเทียมสามารถซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้เพียง 2-3 มิลลิเมตร และหลังจากที่พ่นสารละลายแล้วผิวทางคอนกรีตดังกล่าวยังมีการแตกร้าวอย่างหนักต่อไป (Fournier *et al.*, 2010)

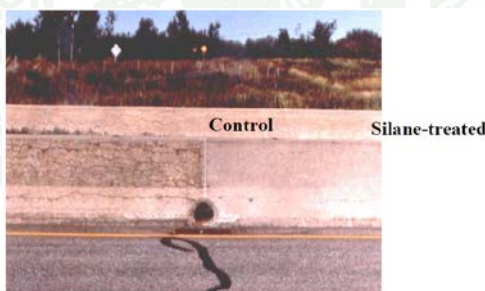


ภาพที่ 18 การฉีดพ่นสารละลาย LiNO_3 บนผิวทางคอนกรีตเพื่อแก้ไขปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

ที่มา: Fournier *et al.* (2010)

5. การใช้สารละลาย Siloxanes

ได้มีการศึกษาพบว่าสารละลายกลุ่ม siloxanes (R_2SiO , ที่ R เป็นไฮโดรเจนอะตอมหรือไฮโดรคาร์บอนอะตอม) โดยเฉพาะ silane (Silicon tetrahydride, SiH_4) สามารถลดปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาของโครงสร้างในสนามได้ (Bérubé *et al.*, 2002a and 2002b; Grabe and Oberholster 2000) และพบว่ามีแนวโน้มที่จะใช้ได้ผลมากกว่าสารละลายลิเทียมโดยมีความลึกในการซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตมากกว่าที่ 5-6 มิลลิเมตร และทำให้ความชื้นจากภายนอกเข้าไปในโครงสร้างลดลงและความชื้นภายในสามารถระเหยออกมาได้ คอนกรีตที่ถูกพ่นทับด้วยสารละลาย Silane จึงมีความชื้นภายในที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของสารละลาย Silane ขึ้นอยู่กับคุณภาพของการฉีดพ่น และมีอายุการใช้งานเนื่องจากจะมีปริมาณลดลงด้วยการเสียดสีจาก Abrasion และรังสีอัลตราไวโอเลต (Fournier *et al.*, 2010) นอกจากนี้ silane ยังเป็นสารไวไฟและมีพิษต่อผู้ใช้งานอีกด้วย (International Programme on Chemical Safety, 1997)



ภาพที่ 19 การฉีดพ่นสารละลาย Silane เพื่อลดปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาของคั่นกั้นถนนในแคนาดา

ที่มา: Fournier *et al.* (2010)

การทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

วิธีการทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาของมวลรวมในคอนกรีตเป็นหัวข้อหนึ่งที่มีความสำคัญและได้มีการศึกษาวิจัยความเหมาะสมและประสิทธิภาพและเสนอเกณฑ์เพื่อใช้ในการทดสอบและตัดสินใจอย่างต่อเนื่อง (American Concrete Institute, 1998) ซึ่งปัญหาในการทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาคือความแตกต่างกันระหว่างมวลรวมแต่ละแห่งแม้จะเป็นชนิดเดียวกัน ทำให้แต่ละประเทศต่างมีแนวทางการทดสอบที่แตกต่างกัน นอกจากนี้โดยปกติแล้วการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในโครงสร้างต้องใช้เวลาอันยาวนาน ทำให้มีนักวิจัยพยายามเสนอวิธีทดสอบที่ใช้ระยะเวลาเร็วขึ้น ด้วยการเร่งการทำปฏิกิริยาแต่ปัญหาที่ตามมาคือกลไกของปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวและต่างจากในสภาวะจริง วิธีทดสอบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปประกอบด้วย การทดสอบทำปฏิกิริยาได้ของมวลรวม การทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในมอร์ตาร์ และการทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในคอนกรีต

1. วิธีในการหาแนวโน้มการทำปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาของมวลรวม

1.1 วิธีศิลาวรรณา (Petrographic Examination)

เป็นวิธีในการหาแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาของมวลรวมเพื่อใช้ในงานคอนกรีตหรือเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM C 295 (American Society for Testing and Materials, 2004) และ RILEM AAR-1 (Sims and Nixon., 2003) โดยปกติแล้วมักใช้เป็นวิธีแรกในการคัดกรองที่จะช่วยบอกแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาหรือไม่ประกอบด้วย

ก. การวิเคราะห์ลักษณะระดับมาโคร (Macroscopic characters analysis) เป็นการพิจารณาในภาพรวมจากลักษณะทางกายภาพของมวลรวมโดยนักธรณีวิทยาโดยใช้อุปกรณ์พื้นฐาน เช่น ดู่ด้วยตาเปล่า หรือแว่นขยาย มีการทดสอบทางเคมีและฟิสิกส์เบื้องต้น เช่น การทดสอบด้วยกรดไฮโดรคลอริก การชุบด้วยวัสดุเพื่อวัดความแข็ง

ข. การวิเคราะห์ลักษณะระดับไมโคร (Microscopic characteristics analysis) เป็นการทดสอบด้วยกล้องขยาย (Microscope) ด้วยหน้าตัดแบบบาง (Thin section) ดู่ด้วยแสง Plane polarized light และ Cross polarization light เพื่อดูลักษณะของ สีและการกระจายของสี การแตกกระจายของเม็ดเกรน (fracture characteristics of the grains) ดัชนีการหักเหแสง (refractive index) และลักษณะการสมมาตรของผลึก (optical symmetry)

ค. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical analysis) เป็นการทดสอบเพื่อหาองค์ประกอบทางเคมี และองค์ประกอบทางแร่ของมวลรวม โดยทั่วไปมักใช้ 2 วิธีประกอบกันคือ การหาองค์ประกอบทางแร่ด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) และการหาองค์ประกอบออกไซด์ด้วยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry, XRF)

ง. การวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบ (Separation of components analysis) เป็นการดูส่วนประกอบของผงแร่หรือเม็ดหินที่อยู่ภายในมวลรวม การเรียงตัวหรือลักษณะผลึกจะบ่งบอกได้ถึงแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้

1.2 วิธีทางเคมี

วิธีทางเคมีเป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไปและใช้เวลาไม่นานในการทดสอบ ซึ่งเป็นประโยชน์ในกรณีที่วิธีมอร์ตาร์บาร์และคอนกรีตปริซึมไม่สามารถให้ผลการทดสอบได้ทัน หลายประเทศที่ที่ยอมรับในแนวทางนี้และใช้ในทางปฏิบัติได้แก่ ASTM C289 (Chemical Method) ของสหรัฐอเมริกา การหาค่าน้ำหนักที่ลดลง (Weight loss method) ของเยอรมนี การหดตัวทางเคมี (Chemical shrinkage method) ของเดนมาร์ก เป็นต้น ในจำนวนนี้วิธีทางเคมี ASTM C289 เป็นการทดสอบที่แพร่หลายที่สุด

วิธีหาการหาแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาของมวลรวมทางเคมี (ASTM C289) เป็นวิธีที่ใช้มวลรวมย่อยละเอียดให้มีขนาด 150 ไมโครเมตร ถึง 300 ไมโครเมตร ปริมาณ 25 กรัม แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 N ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเก็บไว้ในภาชนะขนาด 50 ถึง 75 มิลลิลิตรเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้ซิลิกาที่อยู่ในมวลรวมเกิดปฏิกิริยา แล้วนำสารละลายที่ได้ไปทดสอบหาปริมาณซิลิกาที่ละลายอยู่ในสารละลาย (Dissolve silica, Sc) สารละลายอีกส่วนหนึ่งนำไปไตเตรทด้วยกรดไฮโดรคลอริกเพื่อหาปริมาณของแอลคาไลที่ลดลง (Reduction Alkalinity, Rc) จากนั้นนำค่าทั้งสองไปกำหนดจุดในกราฟมาตรฐาน เพื่อระบุว่ามวลรวมที่ทดสอบเป็น มวลรวมที่ไม่เกิดปฏิกิริยา มวลรวมที่มีแนวโน้มเกิดปฏิกิริยา และมวลรวมที่เกิดการเสื่อมสภาพ อย่างใดอย่างหนึ่ง (ASTM C289; American Society for Testing and Materials, 2003)

2. การทดสอบการทำปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในมอร์ตาร์

2.1 การทดสอบด้วยวิธีการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์

การทดสอบด้วยวิธีการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ (Mortar-bar Test method, MBT) ตาม มาตรฐาน ASTM C 227 เป็นวิธีการทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลมวลรวมวิธีแรกเริ่มใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 ที่ใช้ขั้นตอนเดียวกันกับการศึกษาของ Stanton (1940) การหาแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาด้วยวิธีนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความไวของส่วนผสมซีเมนต์และมวลรวมต่อการขยายตัวจากปฏิกิริยาเนื่องจากแอลคาไล โดยใช้มวลรวมหล่อเป็นแท่งมอร์ตาร์แช่น้ำที่อุณหภูมิ 37.8°C (100°F) และความชื้นสัมพัทธ์สูง โดยวัดค่าความยาวเริ่มต้นที่ 14 วัน และที่ 1, 2, 3, 4, 6, 9, 12 เดือน และทุก 6 หลังจากนั้นถ้าจำเป็น (American Society for Testing and Materials, 2004; ASTM C 227) ข้อจำกัดคือผลการทดสอบอาจไม่แสดงการขยายตัวอย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะมวลรวมที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ การทดสอบใช้เวลานาน และบางครั้งการขยายตัวอาจไม่ได้เกิดจากปฏิกิริยาแอลคาไลและมวลรวม ในภายหลังได้มีการรายงานพบการไหลออกของแอลคาไล (alkali leaching) ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบ (Thomas, 2007)

2.2 การทดสอบด้วยวิธีการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ไฟเร็กซ์

การทดสอบด้วยวิธีการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ไฟเร็กซ์ (Pyrex Mortar Bar Test) ตาม มาตรฐาน ASTM C 441 ได้รับการรับรองครั้งแรกในปี ค.ศ. 1959 เป็นวิธีที่พัฒนาโดยนักวิจัยเพื่อศึกษาการใช้วัสดุที่มี ซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลังเพื่อใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่ม (siliceous admixtures) การทดสอบทำเช่นเดียวกันกับ ASTM C 227 แต่ใช้แก้วไฟเร็กซ์ (Pyrex เป็นชื่อทางการค้า หรือ Borosilicate glass เป็นแก้วที่ทำจากซิลิกาและโบรอนเป็นองค์ประกอบหลัก (Vogel, 1994)) เป็นมวลรวมเพื่อทดสอบผลกระทบตอปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาจากวัสดุผสมเพิ่มนั้น อย่างไรก็ตามความแตกต่างของไฟเร็กซ์ก็เป็นตัวแปรที่ทำให้การเกิดปฏิกิริยาต่างกันได้นอกจากนี้ไฟเร็กซ์บางชนิดยังมีแอลคาไลในตัวเอง (โซเดียมออกไซด์เทียบเท่าประมาณร้อยละ 4) และส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของปฏิกิริยาได้ (Thomas, 2007)

2.3 การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์

การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ (Accelerated Mortar-bar Test method, AMBT) ตาม มาตรฐาน ASTM C 1260 และ RILEM AAR-2 (American Society for Testing and Materials, 2001; RILEM TC 106-AAR, 2000) ได้รับการเสนอเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1986 หลังจากนั้น ASTM และ CSA ได้นำไปพัฒนาเป็นมาตรฐานในปี ค.ศ. 1994 เป็นวิธีพื้นฐานที่ใช้เป็นเกณฑ์เบื้องต้นในการตรวจสอบปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในมวลรวม (Thomas, 2007) มวลรวมที่นำมาทดสอบจะได้รับการย่อยให้มีขนาดละเอียดตามที่กำหนด (เล็กกว่า 4 มิลลิเมตร) แล้วทำการหล่อเป็นแท่งขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร จากนั้นจึงทำการเร่งปฏิกิริยาด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น ด้วยวิธีนี้เมื่อมวลรวมเกิดปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในสารละลายจะก่อให้เกิดอัลคาไลซิลิกาเจลที่ทำให้มอร์ตาร์บาร์เกิดการขยายตัวในเวลาประมาณ 2 สัปดาห์ (ASTM C 1260, AASHTO T303 และ RILEM AAR-2) วิธีนี้เป็นการทดสอบของส่วนผสมระหว่างมวลรวมและปูนซีเมนต์และด้วยการเร่งอัตราการทำปฏิกิริยาจึงทำให้ใช้เวลาทดสอบเพียงสองสัปดาห์จึงช่วยลดปัญหาในการทดสอบมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ช้า แต่ในกรณีที่เป็คอนกรีตเนื่องจากขนาดของมวลรวมที่ถูกย่อยให้เล็กลงอาจทำให้มีความแตกต่างจากสภาพจริงเนื่องจากผลกระทบของขนาด (Size effect) ของมวลรวม เช่นในกรณีของปรากฏการณ์เพชฌิม์วิธีนี้ใช้ศึกษาการเกิดขึ้นของปรากฏการณ์เพชฌิม์ได้ แต่ไม่สามารถบอกได้ว่าที่สัดส่วนผสมเดียวกันจะเกิดปรากฏการณ์เพชฌิม์ได้ในคอนกรีต (Sims and Nixon, 2003)

3. การทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในคอนกรีต

3.1 การตรวจสอบโครงสร้างที่มีปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในสนาม

การตรวจสอบโครงสร้างที่มีปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในสนามมีความสำคัญสำหรับการศึกษาโครงสร้างคอนกรีตที่มีปัญหา โดยผู้ทำการตรวจสอบต้องมีความเข้าใจในปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาสามารถแยกแยะในเบื้องต้นได้ว่าการแตกร้าวนั้นเกิดจากปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ไม่ใช่เป็นรอยแตกร้าวที่เกิดจากปัญหาอื่นซึ่งอาจเกิดจากการขยายตัวด้วยสาเหตุอื่น

เกิดหน่วยแรงและการแตกร้าวๆคล้ายกัน เช่น รอยแตกร้าวแนวเส้นนอนหรือตามขวาง (Linear or longitudinal/transverse cracking) แนวทแยง (diagonal cracking) รอยแตกร้าวแบบแผนที่ (Map cracking) เป็นต้น การตรวจสอบโครงสร้างจริงในสนามเริ่มต้นจากการตรวจสอบข้อมูลพื้นฐาน การสำรวจด้วยตาเปล่า การสำรวจด้วยตาเปล่า การตรวจสอบด้วยสารย้อมสี และการเจาะแท่งคอนกรีตเพื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Sarkar *et al.*, 2004)

การตรวจสอบข้อมูลพื้นฐานของโครงสร้างจากผู้ควบคุมงาน ได้แก่ สัดส่วนผสมคอนกรีต วันเวลาที่ก่อสร้าง ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ สภาพน้ำทะเล-น้ำกร่อย สภาพน้ำท่วม-น้ำขัง เป็นต้น

การสำรวจด้วยตาเปล่า เป็นขั้นตอนแรกที่จะบอกได้คร่าวๆว่าโครงสร้างนั้นเสื่อมสภาพเพราะสาเหตุใด และเป็นไปได้หรือไม่ว่ามีสาเหตุมาจากปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา สัญญาณจากการสำรวจว่ามีแนวโน้มอาจดูได้จาก การแตกร้าวแบบขั้น (Laddering) บริเวณรอยต่อระหว่างโครงสร้าง รอยแตกร้าวแบบแผนที่ (Map cracking) ที่ผิวของโครงสร้างเนื่องจากการขยายตัวภายในโครงสร้าง การหลุดร่อนของมวลรวม (Pop-out) เนื่องจากการดันตัวของแอลคาไลซิลิกาเจลของมวลรวมบริเวณผิวหน้าของคอนกรีต การไหลออกของเจลหรือเจลที่ไหลซึมเข้าไประหว่างรอยร้าวของมวลรวมและเพสต์ การไหลซึมออกมาภายนอก (Exudation) ของเจล และปฏิกิริยารอบๆมวลรวม (Reaction rims) เป็นสิ่งที่ยืนยันการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าหรือแว่นขยาย หากนำไปทดสอบด้วยวิธีสีลาวรรณอีกครั้งหนึ่งจะยืนยันการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้ ตัวอย่างการสำรวจสภาพแสดงในภาพที่ 20

การตรวจสอบด้วยการย้อมสี เพื่อระบุผลผลิตจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว โดยการย้อมสีพื้นที่ผิวสดเปิดใหม่ ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีภายใต้สารละลายที่ใช้ วิธีที่เป็นที่ยอมรับทั้งการทดสอบในสนามและในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ วิธีตรวจสอบการเรืองแสงด้วยยูรานิลอะซิเตต (Uranyl acetate gel fluorescence test) และวิธีทดสอบด้วยการย้อมสีลอซาลามอส (Los Alamos staining method) ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวต่อไป

การเจาะแท่งคอนกรีตเพื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในการยืนยันการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในโครงสร้างขั้นตอนสำคัญอีกอย่างหนึ่งคือการเก็บตัวอย่างเพื่อไปตรวจสอบต่อในห้องปฏิบัติการ ตำแหน่งในการเจาะจำเป็นต้องผ่านการตรวจสอบว่ามีความจำเป็นในการศึกษาปัญหา เช่น สัดส่วนผสมคอนกรีตในโครงสร้างนั้น ชนิดของโครงสร้าง ความแตกต่างของโครงสร้างที่เจาะ

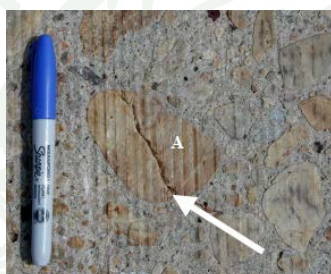
อันตรายต่อโครงสร้างจากการเจาะ อายุของคอนกรีตที่เจาะหากมีตัวอย่างที่อายุต่าง ๆ กันก็จะทำให้มีข้อมูลที่ชัดเจนขึ้น และความแปรปรวนของรอยแตกร้าว



(ก)

(ข)

(ค)



(ง)



(จ)

ภาพที่ 20 ลักษณะความเสียหายจากปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาจำแนกตามรูปแบบ (ก) การแตกร้าวแบบขึ้น (ข) รอยแตกร้าวแบบแผ่นที่ (ค) การหลุดร่อนของมวลรวม (ง) การแตกร้าวภายในมวลรวม (จ) ร่องรอยการไหลซึมของเจลบนผิวภายนอก

ที่มา: Sarkar et al., (2004)

3.2 การทดสอบด้วยวิธีศิลาวรรณาสำหรับมวลรวมในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

การทดสอบด้วยวิธีศิลาวรรณาสำหรับมวลรวมในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว (ASTM C 856, Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete) เป็นการใช้วิธีศิลาวรรณาในการทดสอบคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ที่ได้จากโครงสร้างในสนามหรือชิ้นส่วนตัวอย่างในห้องทดลอง ที่สภาวะใช้งานจริงหรือสภาวะแวดล้อมจำลองในห้องปฏิบัติการ (American Society for Testing and Materials, 2004) นำมาทดสอบด้วยการดูด้วยสายตาและกล้องจุลทรรศน์และมี

การวิเคราะห์เช่นเดียวกันกับ วิธีสีลาบรรณาในการหาแนวโน้มปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาของมวลรวมด้วย (ASTM C 295)

3.3 การทดสอบด้วยวิธีคอนกรีตปริซึม

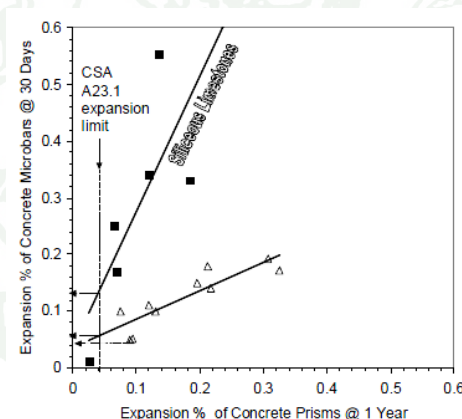
การทดสอบด้วยวิธีคอนกรีตปริซึม (Concrete prism test, CPT) เป็นวิธีตามมาตรฐาน ASTM C 1293, CSA A23.1 และ RILEM AAR-3 ใช้การหาค่าเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีตเนื่องจากการขยายตัวของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาของมวลรวม พัฒนาครั้งแรกโดย Swenson และ Gillott นักวิจัยในประเทศแคนาดาในปี ค.ศ. 1964 (Thomas, 2007) โดยใช้มวลรวมขนาดระหว่างตะแกรงเบอร์ 4 ถึง 3/4 นิ้ว และผสมสารละลายแอลคาไลเข้าไปในคอนกรีตสดให้มีปริมาณแอลคาไล 5.25 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือมีปริมาณโซเดียมออกไซด์เทียบเท่าร้อยละ 1.25 ใช้แบบหล่อมีขนาด 75x75x285 มิลลิเมตร บ่มที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส วัดค่าความยาวของแท่งตัวอย่างที่ 7 28 56 วัน 3 6 9 และ 12 เดือน และทุก 6 เดือน หลังจากนั้น การขยายตัวจะเป็นตัวตัดสินว่ามวลรวมเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาหรือไม่ ตามมาตรฐาน CSA A23.1 กำหนดให้การขยายตัวที่ 1 ปี ร้อยละ 0.4 ขึ้นไปถือว่ามีความเสี่ยงของการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (American Society for Testing and Materials, 2004) ในขณะที่ RILEM AAR-3 ให้ข้อแนะนำว่าหากการขยายตัวที่อายุ 1 ปี น้อยกว่าร้อยละ 0.05 มีแนวโน้มว่า มวลรวมนั้นจะไม่เกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา และหากการขยายตัวมากกว่าร้อยละ 0.1 ถือว่ามวลรวมนั้นมีการขยายตัวเกินกำหนด แต่ยังไม่ถือว่าเป็นข้อยุติสำหรับแต่ละประเทศ (Sims and Nix, 2003)

วิธีทดสอบนี้มีความน่าเชื่อถือมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีมอร์ตาร์บาร์ และสามารถใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุที่จะยับยั้งหรือควบคุมการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาทั้งในกรณีสารประกอบลิเทียมและวัสดุผสมเพิ่มชนิดต่างๆ นอกจากนี้ยังมีปัญหาการไหลชะของแอลคาไล (Alkali leaching) น้อยกว่าเมื่อเทียบกับวิธีมอร์ตาร์บาร์ แต่ถึงอย่างนั้นนักวิจัยยังพยายามพัฒนาให้มีวิธีทดสอบที่ดีขึ้นอีก เนื่องจากวิธีนี้ยังใช้เวลาในการทดสอบที่นานเกินไป แม้ว่าปัญหาการไหลออกของแอลคาไลยังเป็นปัญหาสำคัญที่หลีกเลี่ยงได้ยากในการพัฒนา (Thomas, 2007)

3.4 การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งคอนกรีตโมโครบาร์

วิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งคอนกรีตโมโครบาร์ เป็นวิธีที่ถูกเสนอให้ใช้สำหรับทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลมวลรวม ที่สามารถใช้ได้ทั้งปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา และปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอนेट (National Research Council of Canada; Zhongzi et al., 2002; Grattan-Bellew

et al., 2003) ซึ่งพัฒนาจาก Chinese Method โดยมีขั้นตอนคล้ายคลึงกับการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ โดยใช้การแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 N ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกัน แต่มีขนาดของมวลรวมและตัวอย่างที่ต่างกันคือเป็นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 12.5 มิลลิเมตร และ ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4.75 มิลลิเมตร และแท่งตัวอย่าง 40x40x160 มิลลิเมตร และในบางกรณีอาจใช้ความยาวเพิ่มเป็น 40x40x300 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับวิธีคอนกรีตปริซึมที่อุณหภูมิ 38 และปริมาณโซเดียมออกไซด์เทียบเท่าร้อยละ 1.25 (ASTM C 1293, CSA A23.1 และ RILEM AAR-3) พบว่าที่อายุทดสอบ 30 วัน มีค่าการขยายตัวใกล้เคียงกับวิธีคอนกรีตปริซึมที่อายุทดสอบ 1 ปี (ภาพที่ 21) โดย Grattan-Bellew และคณะ เสนอเกณฑ์ในการตัดสินใจการเกิดปฏิกิริยาสำหรับวิธีนี้เทียบเท่ากับวิธีคอนกรีตปริซึม (ที่อายุ 1 ปี ค่าการขยายตัวไม่เกินร้อยละ 0.04) ใช้เกณฑ์การขยายตัว ณ อายุ 30 วัน ไม่เกินร้อยละ 0.05 ส่วน Siliceous Limestone ให้ใช้เกณฑ์ที่การขยายตัว ไม่เกินร้อยละ 0.14 ปัจจุบัน RILEM ได้แนะนำให้ใช้วิธีนี้กับการทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอนेटได้ (RILEM-AAR-5; Sommer et al., 2005)

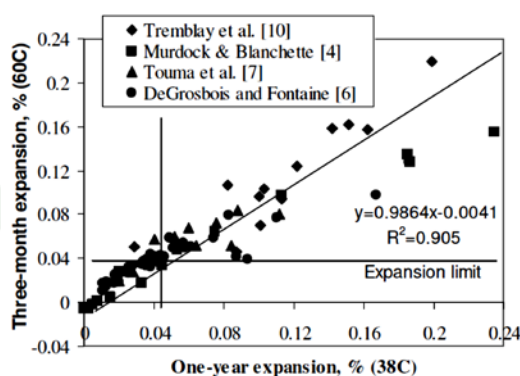


ภาพที่ 21 เปรียบเทียบการเร่งอัตราการขยายตัวระหว่างวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งคอนกรีตไมโครบาร์และวิธีคอนกรีตปริซึม

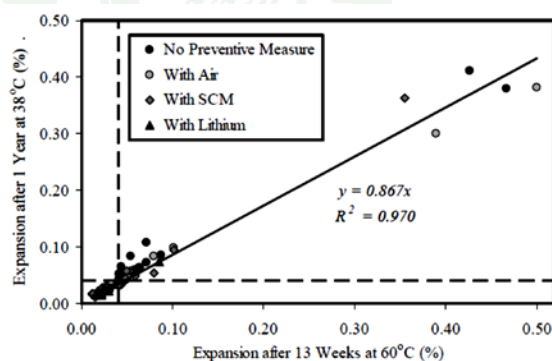
ที่มา: Grattan-Bellew et al., 2003

3.5 การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาของคอนกรีตปริซึม

การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาของคอนกรีตปริซึม (Accelerated Concrete Prism Test, ACPT) ได้รับการเสนอโดย Ranc และ Debray ในปี ค.ศ. 1992 ด้วยการเร่งอัตราการขยายตัวของคอนกรีตปริซึมเพิ่มอุณหภูมิเป็น 60 องศาเซลเซียส (Thomas *et al.*, 2007) อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังอยู่ในระหว่างการพัฒนาโดย RILEM เป็น RILEM AAR-4 (RILEM TC 191-ARP Alkali-reactivity and prevention กลุ่มนักวิจัยของ RILEM) และขณะนี้ RILEM TC 191-ARP อยู่ในระหว่างการประเมินประสิทธิภาพ (Sims and Nixon, 2003) ซึ่งพิจารณาโดยใช้พื้นฐานจากวิธีคอนกรีตปริซึม (RILEM AAR-3, ASTM C 1293) โดยใช้มวลรวมต่างกันในการผสมคอนกรีตโดยการปรับเปลี่ยนตัวแปรของชนิดมวลรวม ทั้งที่ทำปฏิกิริยาได้และไม่ทำปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา โดยต้องการปรับให้มีความแปรปรวนให้ใกล้เคียงกับวิธีคอนกรีตปริซึม (Fournier *et al.*, 2004) โดยคาดหวังว่าที่อายุทดสอบ 3 เดือนจะมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบ ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ปี (ภาพที่ 22 ก.) ในขณะที่ Touma *et al.* (2001) ก็ได้ศึกษาวิธีนี้ในกรณีที่ใช้สารผสมเพิ่ม (air-entrainment, SCM and lithium nitrate) ก็พบว่ามีความสอดคล้องของทั้งสองวิธีเช่นกัน (ภาพที่ 22 ข.) (Thomas *et al.*, 2007)



(ก)



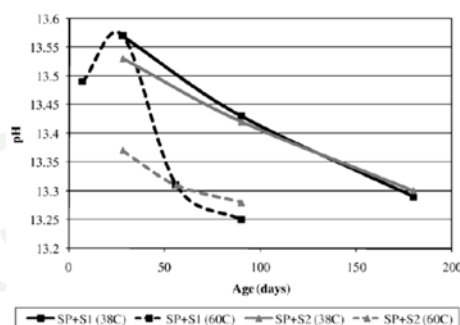
(ข)

ภาพที่ 22 (ก) เปรียบเทียบการเร่งอัตราการขยายตัวระหว่างวิธีเร่งปฏิกิริยาของคอนกรีตปริซึมและวิธีคอนกรีตปริซึม (ข) เปรียบเทียบทั้งสองวิธีกรณีที่ใช้สารผสมเพิ่ม

ที่มา: (a) Fournier *et al.* (2004) (b) Thomas *et al.* (2007)

ปัญหาการไหลออกของแอลคาไลก็เกิดขึ้นกับวิธีทดสอบนี้เช่นเดียวกับวิธีศึกษาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาด้วยวิธีการเร่งวิธีอื่นๆ Ideker *et al.* (2010) ได้ศึกษาสารละลายในช่องว่างพบว่าใน

คอนกรีตที่อายุระหว่าง 7 ถึง 28 วันแรก เกิดปัญหาการไหลออกของแอลคาไลในวิธีเร่งปฏิกิริยาของคอนกรีตปรีซิมสูงกว่าวิธีคอนกรีตปรีซิมอย่างเห็นได้ชัด และเป็นอุปสรรคที่ทำให้วิธีนี้อาจเปลี่ยนแปลงกระบวนการของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาของตัวอย่างทดสอบได้ ดังแสดงในภาพที่ 23



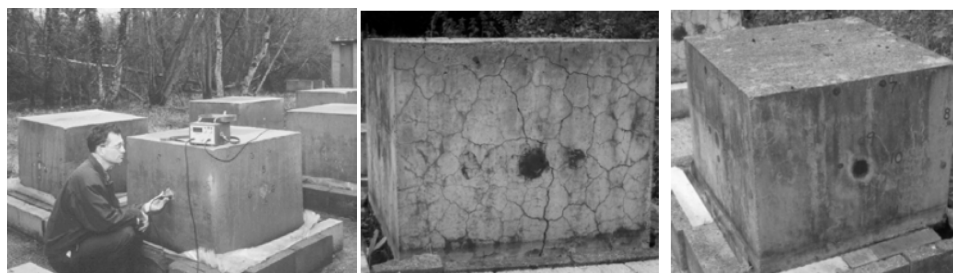
ภาพที่ 23 การลดลงของค่า pH ในวิธีเร่งปฏิกิริยาของคอนกรีตปรีซิมและวิธีคอนกรีตปรีซิม

ที่มา: Ideker *et al.* (2010)

วิธีนี้หากสามารถใช้อ้างอิงได้จะเป็นวิธีที่มีประโยชน์ในการศึกษาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกามากเนื่องจากใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่า อย่างไรก็ตามผลเบื้องต้นที่กลุ่มที่นักวิจัยพบว่าถ้าการขยายตัวในระยะเวลา 3 เดือน ไม่เกินร้อยละ 0.02 แสดงว่ามวลรวมนั้นจะเป็นส่วนผสมที่ไม่เกิดการขยายตัว (Sims and Nixon, 2003) และหากการขยายตัวสูงกว่าร้อยละ 0.04 มีแนวโน้มว่ามวลรวมนั้นจะเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (Thomas *et al.*, 2007)

3.6 วิธีแท่งคอนกรีตขนาดใหญ่ในสนาม

วิธีแท่งคอนกรีตขนาดใหญ่ในสนาม (Field Exposure of Large Concrete Blocks) เป็นการสังเกตพฤติกรรมของแท่งคอนกรีตขนาดใหญ่ในสนามที่มีพื้นที่เปิดตามธรรมชาติ เป็นวิธีที่ดีในการเก็บบันทึกข้อมูลและสอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงมากที่สุด ในหลายประเทศได้มีการหล่อตัวอย่างแท่งคอนกรีตด้วยวิธีนี้และทำการศึกษามาเป็นเวลานานมากกว่า 10 ปี เช่น ที่ Building Research Establishment (BRE) ประเทศอังกฤษ ได้หล่อแท่งคอนกรีตขนาด 35x35x90 เซนติเมตร และฐานด้านล่างขังด้วยน้ำระดับ 2.5 ถึง 5.0 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 24 (ก) (ข) และ (ค) ในแท่งคอนกรีตได้ฝังหมุดเพื่อวัดการขยายตัวที่ระยะ 9.0 เซนติเมตร ไว้ 9 ชุดด้วยกัน ค่าการขยายตัวจะถูกวัดและเก็บข้อมูลไว้เป็นระยะ เช่นเดียวกันกับที่ The University of Texas in Austin สหรัฐอเมริกา และ CANMET-MTL แคนาดา ดังแสดงในภาพที่ 24 (ง) และ (จ) ตามลำดับ



(ก)

(ข)

(ค)



(ง)



(จ)

ภาพที่ 24 การศึกษาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาด้วยแท่งคอนกรีตขนาดใหญ่ในสนาม (ก-ค) Building Research Establishment (BRE) ประเทศอังกฤษ แท่งคอนกรีตมีอายุ 11 ปี (ข) แท่งคอนกรีตควบคุม (ค) แท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 25 (ง) The University of Texas in Austin สหรัฐอเมริกา และ (จ) CANMET-MTL แคนาดา

ที่มา: Thomas *et al.* (2007)

3.7 วิธีตรวจสอบการเรืองแสงด้วยยูรานิลอะซิเตท

วิธีตรวจสอบการเรืองแสงด้วยยูรานิลอะซิเตท (Uranyl acetate gel fluorescence test) เป็นวิธีที่ระบุในภาคผนวกของ ASTM C 856 (AASHTO T 299) ได้ระบุถึงวิธีการใช้สารละลายยูรานิลอะซิเตท (Uranyl-acetate, $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ใช้ในการระบุตำแหน่งผลผลิตจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วใช้ระบุผลผลิตของแอลคาไลซิลิกา ในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วที่ได้ทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการ ด้วยการฉาบสารละลายที่ผิวพื้นที่ผิวเปิดใหม่และ

ต้องทำการฉาบโดยเร็วเนื่องจากสารละลายจะทำปฏิกิริยากับอ็อกไซด์ของแอลคาไลซิลิกาเจลที่ถูก
 ผนวกด้วยสภาพแวดล้อมได้ หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างนี้ไปตรวจสอบการเรืองแสงภายใต้แสงอุลตรา
 ไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ผลผลิตของแอลคาไลซิลิกาจะก่อให้เกิดการเรืองแสงที่
 สังเกตเห็นหากมีแอลคาไลซิลิกาเจลจะก่อให้เกิดการเรืองแสงสีเหลืองเขียว ดังแสดงในภาพที่ 25
 อย่างไรก็ตาม แก้วลอย ซิลิกาฟุ้ง ตะกรันเตาถลุง (Slag) วัสดุพอซโซลานธรรมชาติ (Natural
 pozzolans) โอปอล มวลรวมบางชนิด และคาร์บอนเนตเพสต์สามารถเรืองแสงได้ด้วยสารละลายยูรา
 นิอะซีเตทเช่นกัน (American Society for Testing and Materials, 2004; ASTM C 856) วิธีนี้จึง
 ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญและต้องทำควบคู่ไปกับวิธีพีโตกราฟฟิก และการทดสอบทางกายภาพเพื่อหาการ
 ขยายตัวของคอนกรีต



ภาพที่ 25 การสะท้อนแสงของชิ้นตัวอย่างจากโครงสร้างจริงด้วย Uranyl Acetate (ก) ภายใต้แสง
 ธรรมชาติ และ (ข) ภายใต้แสง UV ในห้องมืด

ที่มา: Sujjavanich *et al.* (2012)

3.8 วิธีทดสอบด้วยการย้อมสีลอซาลามอส

วิธีทดสอบด้วยการย้อมสีลอซาลามอส (Los Alamos staining method) เป็นวิธีเสนอ
 โดย Guthrie และ Carey ในปี ค.ศ. 1998 โดยต้องการระบุแอลคาไลซิลิกาเจลด้วยเทคนิคการย้อม
 สีทางเคมี (chemical staining technique) ที่อ้างอิงหลักการธรณีเคมี (Geochemical methods)
 ด้วยการใช้เทคนิคการย้อมสีเพื่อระบุตำแหน่งที่เกิดแอลคาไลซิลิกาเจลโดยการเปลี่ยนสีจะขึ้นอยู่กับ
 ชนิดของอ็อกไซด์ ในสารละลายประกอบด้วยสารย้อมสีสองชนิด โดยเมื่อผิวของคอนกรีตเปิดใหม่มีแอล
 คาไลซิลิกาเจลจะเกิดประจุของโปตัสเซียมอ็อกไซด์ที่ทำปฏิกิริยากับโซเดียมโคบอลต์ไนไตรท์ (Sodium
 cobaltinitrite, $\text{Na}_3\text{Co}(\text{NO}_2)_6$) และเกิดการเปลี่ยนแปลงให้สารสีเหลืองและโรดาโนน

(Rhodamine) ที่ประกอบด้วย โรดาไนน์ B ($C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$) โรดาไนน์ B base ($C_{28}H_{30}N_2O_3$) และ โรดาไมน์ 6G (rhodamine 6G) ($C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$) ที่ให้อีกสีที่ต่างกันในเมทริกซ์และมวลรวม ส่วนที่เหลือ (Guthrie and Carey, 1998) ทำให้เกิดการแบ่งบริเวณที่มีแอลคาไลซิลิกาเจลให้เกิดความชัดเจนและระบุได้ว่าคอนกรีตนั้นเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

4. สรุปวิธีทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

เมื่อพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ ชนิด ระยะเวลา และข้อแนะนำในการใช้งานสามารถสรุปวิธีทดสอบได้ดังแสดงในตารางที่ 3 ในขณะที่ RILEM ได้แนะนำในการพิจารณาปฏิกิริยาแอลคาไลมวลรวมใน RILEM AAR-0 โดยแยกขั้นตอนการพิจารณาสำหรับปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา คือ RILEM AAR-1, AAR-2, AAR-3 และ AAR-4 และปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอนेट คือ RILEM AAR-1, AAR-3 และ AAR-5 (Sims and Nixon, 2003) ดังแสดงขั้นตอนในภาพที่ 26 และรายละเอียดในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 สรุปวิธีการทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในมวลรวม

วิธีทดสอบ	วัตถุประสงค์	ชนิดของการทดสอบ	ระยะเวลาในการทดสอบ	ข้อแนะนำ
1. วิธีในการหาแนวโน้มการทำปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาของมวลรวม				
วิธีศิลาวรรณา (Petrographic Examination; ASTM C 295 และ RILEM AAR-1)	ใช้วิธีศิลาวรรณาทดสอบมวลรวม	ด้วยสายตาและกล้องจุลทรรศน์ ทดสอบและทำการเตรียมตัวอย่างประกอบด้วย การวิเคราะห์ตะแกรงร่อน (sieve analysis) กล้องจุลทรรศน์ การขีด และการใช้กรด	ระยะเวลาสั้น ดูด้วยสายตา ใช้เวลาทดสอบไม่มากนัก	ต้องใช้ควบคู่ไปกับกล้องขยาย และต้องวิเคราะห์รังสีเอกซ์ (XRD or XRF analysis) differential thermal analysis การเตรียมตัวอย่าง และประสบการณ์ของผู้ทดสอบมีความสำคัญอย่างมาก
วิธีทางเคมี (Chemical Method; ASTM C289)	หาแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาของมวลรวมที่มีซิลิกา	นำตัวอย่างทำปฏิกิริยากับ สารละลายแอลคาไลที่ $80^{\circ}C$ ($176^{\circ}F$)	24 ชั่วโมง	- ได้ผลเร็ว - มวลรวมบางชนิดอาจมีการขยายตัวต่ำ

เป็นองค์ประกอบ

- ความน่าเชื่อถือน้อย

ตารางที่ 3 (ต่อ)

วิธีทดสอบ	วัตถุประสงค์	ชนิดของการทดสอบ	ระยะเวลาในการทดสอบ	ข้อแนะนำ
2. การทดสอบการทำปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในมอร์ตาร์				
การทดสอบด้วยวิธีการ ขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ (Mortar-bar Test method, MBT; ASTM C 227)	ทดสอบความไว ของส่วนผสมซีเมนต์-มวลรวมที่มี ต่อการขยายตัว จากปฏิกิริยาแอล คาไลซิลิกา	แท่งมอร์ตาร์เก็บในน้ำที่อุณหภูมิ 37.8°C (100°F) และความชื้นสัมพัทธ์สูง	วัดค่าเริ่มต้นที่ 14 วัน และที่ 1, 2, 3, 4, 6, 9, และ 12 เดือน; ทุก 6 เดือน; หลังจากนั้นถ้าจำเป็น	ผลการทดสอบอาจไม่แสดง การขยายตัวอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะมวลรวมที่มีคาร์บอนเตเป็นองค์ประกอบ การทดสอบใช้เวลานาน และบางครั้งการขยายตัวอาจไม่ได้เกิดจากปฏิกิริยาแอลคาไลและมวลรวม
การทดสอบด้วยวิธีการ ขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ไฟเร็กซ์ (Pyrex Mortar Bar Test; ASTM C 441)	หาคัดภาพของ วัสดุแทนที่ซีเมนต์ ในการควบคุมการ ขยายตัวจาก ปฏิกิริยาแอล คาไลซิลิกา	แท่งมอร์ตาร์โดยใช้ Pyrex glass เป็นมวลรวม เก็บในน้ำที่อุณหภูมิ 37.8°C (100°F) และความชื้นสัมพัทธ์สูง	เริ่มต้นที่ 14 วัน และที่ 1, 2, 3, 4, 6, 9, และ 12 เดือน; ทุก 6 เดือน; หลังจากนั้นถ้าจำเป็น	มวลรวมดัดแปลง (Pyrex มีส่วนประกอบเป็น แอลคาไล) ที่ทำปฏิกิริยาได้สูงนี้อาจแสดงผลได้ไม่ตรงตามเงื่อนไขของมวลรวมจริง
การทดสอบด้วยวิธีเร่ง ปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ (Accelerated Mortar-bar Test method, AMBT; ASTM C 1260 และ RILEM AAR-2)	เพื่อหาคัดภาพ ของการขยายตัว จากปฏิกิริยาแอล คาไลซิลิกาใน ส่วนผสมซีเมนต์ และมวลรวม ใน แท่งมอร์ตาร์	แช่แท่งมอร์ตาร์เก็บในสารละลายแอลคาไล ที่อุณหภูมิ 80°C (176°F) และความชื้นสัมพัทธ์สูง	16 วัน	เป็นทางเลือกที่เร็วมากเมื่อเทียบกับ C 227 และมีประโยชน์อย่างมากสำหรับมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ช้า การเร่งปฏิกิริยาสูงมากอาจคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

ตารางที่ 3 (ต่อ)

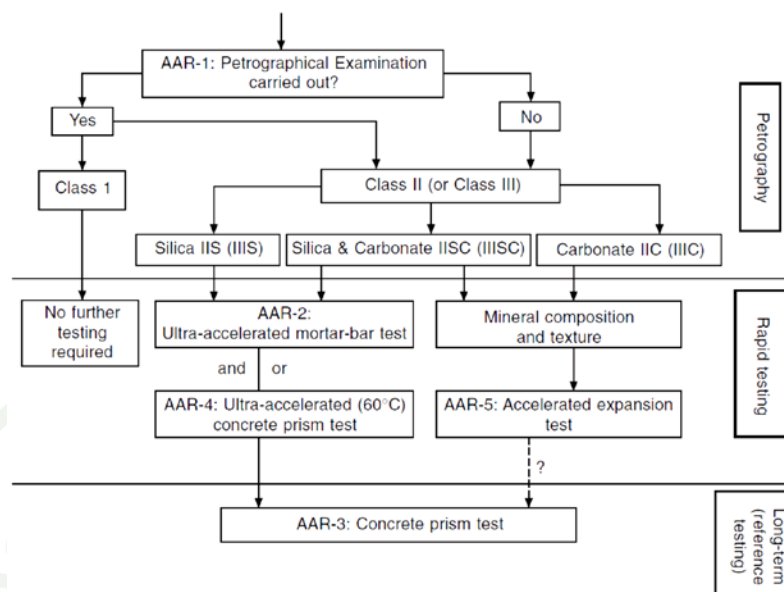
วิธีทดสอบ	วัตถุประสงค์	ชนิดของการทดสอบ	ระยะเวลาในการทดสอบ	ข้อแนะนำ
3. การทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในคอนกรีต				
การทดสอบด้วยวิธี ศิลาวรรณาสำหรับ มวลรวมในคอนกรีตที่ แข็งตัวแล้ว (Petrographic Examination of Hardened concrete; ASTM C 856)	ใช้วิธีศิลาวรรณา ในการทดสอบ คอนกรีตที่แข็งตัว แล้ว ภายใต้เงื่อนไข การใช้งาน	ด้วยสายตาและกล้อง จุลทรรศน์ ทดสอบและ ทำการเตรียมตัวอย่าง	ระยะเวลาสั้น	ตัวอย่างทำการทดสอบโดย stereomicroscopes, polarizing microscopes, metallographic microscopes และ SEM การเตรียมตัวอย่าง และ ประสบการณ์ของผู้ทดสอบมี ความสำคัญอย่างมาก
การทดสอบด้วยวิธี คอนกรีตปริซึม (Concrete prism test, CPT; ASTM C 1293, CSA A23.2- 14A และ RILEM AAR-3)	เพื่อทดสอบการ ขยายตัวใน คอนกรีตจาก ปฏิกิริยาแอล คาไลซิลิกา	คอนกรีตปริซึมเก็บใน ความชื้นที่อุณหภูมิ 38°C (100.4°F) ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อย ละ 100	วัดค่าเริ่มต้นที่ 7 วัน 28 และ 56 วัน หลังจากนั้น 3, 6, 9, และ 12 เดือน; ทุก 6 เดือน หลังจาก นั้นถ้าจำเป็น	เป็นวิธีที่นิยมในการ ประเมินค่าและดีที่สุด แต่ ต้องการเวลานานเพื่อ แสดงผลการทดสอบเป็น ส่วนเพิ่มเติมสำหรับ C 227,C 295, C 289 และ C 1260 วิธีการเหมือนกับ CSA A23.2-14A
การทดสอบด้วยวิธี เร่งปฏิกิริยา คอนกรีตปริซึม (Accelerated Concrete Prism Test, ACPT; RILEM AAR-4)	ทดสอบการ ขยายตัวใน คอนกรีตจาก ปฏิกิริยาแอล คาไลซิลิกา	เร่งอัตราการ ขยายตัวของ คอนกรีตปริซึมเพิ่ม อุณหภูมิเป็น 60 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อย ละ 100	วัดค่าเริ่มต้นที่ 1 วัน และ 35, 70, 105 และ 140 วัน; ทุก 6 เดือน หลังจาก นั้นถ้าจำเป็น	มีประโยชน์ใน การศึกษาอย่างมาก เนื่องจากใช้ระยะเวลา ที่สั้น มีความน่าเชื่อถือ รองจาก CPT แต่ต้องระวัง ปัญหาการชะออกของแอล คาไล ข้อจำกัดคือเกณฑ์ ขึ้นอยู่กับประสบการณ์

และข้อมูลท้องถิ่น

ตารางที่ 3 (ต่อ)

วิธีทดสอบ	วัตถุประสงค์	ชนิดของการทดสอบ	ระยะเวลาในการทดสอบ	ข้อแนะนำ
การทดสอบแท่งคอนกรีตขนาดใหญ่ในสนาม (Field Exposure of Large Concrete Blocks)	แท่งคอนกรีตในสภาพแวดล้อมที่สนใจศึกษา	หล่อแท่งคอนกรีตทั้งในสนามที่มีพื้นที่เปิดตามธรรมชาติ	ไม่มีระยะเวลาชัดเจน โดยมากใช้เวลานานจนเกิดพฤติกรรมที่สนใจ	ความน่าเชื่อถือสูงที่สุด แต่ไม่มีการเร่งปฏิกิริยา แต่ใช้เวลานาน คล้ายโครงสร้างจริง บางกรณีใช้เวลาเกินกว่า 10 ปี
วิธีตรวจสอบการเรืองแสงด้วยยูรานิลอะซิเตท (Uranyl acetate gel fluorescence test; ASTM C 856 และ AASHTO T 299))	เพื่อระบุผลผลิตจาก ปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว	ย้อมสีพื้นที่ผิวสดเปิดใหม่ และดูภายใต้แสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet, UV)	ได้ผลทันที	ระบุผล ASR gel ที่ทำให้เกิดการขยายตัวบางกรณีรวมถึงรวมธรรมชาติ และคาร์บอนเตสท์สามารถเรืองแสงได้ การแปลค่าต้องแม่นยำ และต้องทำควบคู่ไปกับวิธีสีลาอรรณา และการทดสอบทางกายภาพเพื่อหาการขยายตัวของคอนกรีต
วิธีทดสอบด้วยการย้อมสีลอซอลามอส (Los Alamos staining method)	เพื่อระบุผลผลิตจาก ปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว	ย้อมสีพื้นที่ผิวสดเปิดใหม่ ด้วยสารละลายสองชนิด	ได้ผลทันที	ปัญหาเนื่องจากการเกิดแตกตัวของไอออนจะลดลงตามอายุของสารละลาย

ที่มา: Guthrie and Carey (1998); Powers (1999); Farny and Kerkhoff (2007); Thomas *et al.* (2007); Ideker *et al.* (2010)



ภาพที่ 26 กระบวนการทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลมวลรวมของ RILEM

ที่มา: Sims and Nixon (2003)

ตารางที่ 4 วิธีการทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในมวลรวม ตามมาตรฐาน RILEM

วิธีทดสอบ	เทียบเท่า	วัสดุประสงค์	ชนิดของการทดสอบ	ระยะเวลา	ข้อแนะนำ
AAR-1	ASTM C 856	ASR+ACR	วิธีพีโตกราฟฟิก	ระยะเวลาสั้น	ทดสอบภายใต้ผู้เชี่ยวชาญ
AAR-2	ASTM C1260	ASR	แท่งมอร์ตาร์ 25x25x285 80°C แชใน NaOH 1N	16 วัน	แนะนำให้ทดสอบวิธีอื่นประกอบด้วย
AAR-3	ASTM C1293	ASR+ACR	คอนกรีตปริซึม 75x75x285 38°C 100% RH	12-24 เดือน	วิธีที่อ้างอิงได้ดีที่สุด
AAR-4		ASR	คอนกรีตปริซึม 75x75x285 60°C 100% RH	20 สัปดาห์	อยู่ระหว่างการทดสอบความน่าเชื่อถือ
AAR-5		ACR	Micro bar 40x40x160 80°C แชใน NaOH 1M	30 วัน	ใช้กับหินคาร์บอน

5. เกณฑ์ตัดสินการทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

ในหลายประเทศมีวิธีทดสอบและแยกระดับความเสี่ยงของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในมวลรวมที่แตกต่างกัน วิธีทดสอบทั่วไปได้แก่ วิธีซิลาวรรณา วิธีวัดการขยายตัวของมอร์ตาร์บาร์ และวิธีวัดการขยายตัวของคอนกรีตปริซึม ดังได้กล่าวมาแล้ว ส่วนใหญ่ยอมรับการสำรวจในสนามเพื่อแยกแยะหินที่มีปัญหา ในขณะที่วิธีซิลาวรรณาเป็นวิธีทั่วไปที่ใช้สำหรับการจำแนกหินที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกจากหินที่ทำปฏิกิริยา ในส่วนของมอร์ตาร์บาร์และคอนกรีตปริซึมมีขอบเขตการตัดสินว่ามวลรวมมีปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 5

ในแต่ละประเทศต่างมีความคล้ายคลึงกันและแตกต่างกันในเกณฑ์ที่ใช้ตัดสินว่ามวลรวมนั้นมีปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาหรือไม่ให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมและบริบทของตนเอง ซึ่งในประเทศไทยยังมีการศึกษาในด้านนี้ไม่เพียงพอ จึงทำให้ยังไม่มีเกณฑ์เพื่อประกอบการพิจารณา

ตารางที่ 5 วิธีทดสอบและเกณฑ์ในการทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในมวลรวม

ประเทศ/มาตรฐาน	การเร่งปฏิกิริยาในมอร์ตาร์บาร์ (ร้อยละ)*	คอนกรีตปริซึม (ร้อยละ)*	ซิลาวรรณา	สำรวจในสนาม
RILEM/AAR	0.10-0.20	0.05-0.10	ใช้	ใช้
สหรัฐอเมริกา/ASTM	0.10-0.20	0.04	ใช้	-
สหราชอาณาจักร /BS	-	0.05-0.10	ใช้	-
แคนาดา/CSA	0.15	0.04-0.12	ใช้	ใช้
ญี่ปุ่น/JCI, JIS	0.10-0.20**	-	ใช้	ใช้
ฝรั่งเศส/XP	ไม่มีมาตรฐานทดสอบ		ใช้	ใช้
เนเธอร์แลนด์	ไม่มีมาตรฐานทดสอบ		ใช้	-
นอร์เวย์	0.10-0.25	-	ใช้	-
เดนมาร์ก	ไม่มีมาตรฐานทดสอบ		ใช้	-

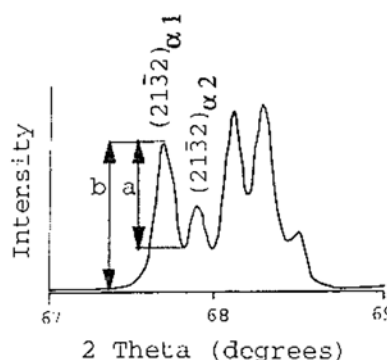
หมายเหตุ: * 0.10%-0.20% ตัวเลขแรกหมายถึงหากผลการทดสอบมีค่าต่ำกว่านี้ถือว่ามวลรวมนั้นไม่เกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ในขณะที่ตัวเลขหลังหมายถึงหากมีค่าสูงกว่าถือว่ามวลรวมนั้นเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา, 0.15% หมายถึงเกณฑ์ของมวลรวมที่ไม่เกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ** Autoclave test JIS JIS A1804 (2007)

ที่มา: Chak and Chan (2005); Touma (2000)

การวิเคราะห์ผลึกภัณฑ์จากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

1. ดัชนีความเป็นผลึก

ดัชนีความเป็นผลึก (Crystallinity index, CI) เป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลึกที่ได้จากการหาองค์ประกอบทางแร่ของมวลรวมด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Murato and Norman, 1976) ในวิธีนี้จะวิเคราะห์ค่าการสะท้อนของรังสีที่มุม 2θ ระหว่าง 67 ถึง 69 องศา ที่ความเข้มของการสะท้อน (Intensity) จุดสูงสุด (Peak) ชัดแรกโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างจุดต่ำสุดของกราฟ (a) และสูงสุด (b) ณ Peak นี้ ดังแสดงในภาพที่ 27



ภาพที่ 27 การสะท้อนของจุดสูงสุดของวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ใช้ในการหาค่าดัชนีความเป็นผลึก

ที่มา: Sarkar *et al.* (2001)

โดยค่า CI คำนวณได้ดังนี้

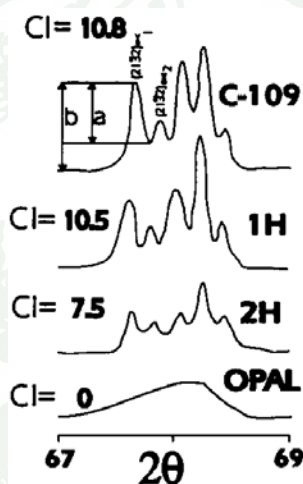
$$CI = \frac{a}{b} \times 15 \quad (10)$$

เมื่อ

a = ความสูงต่ำสุดหลังจากผ่าน Peak แรก ที่มุม 2θ ระหว่าง 67 ถึง 69 องศา

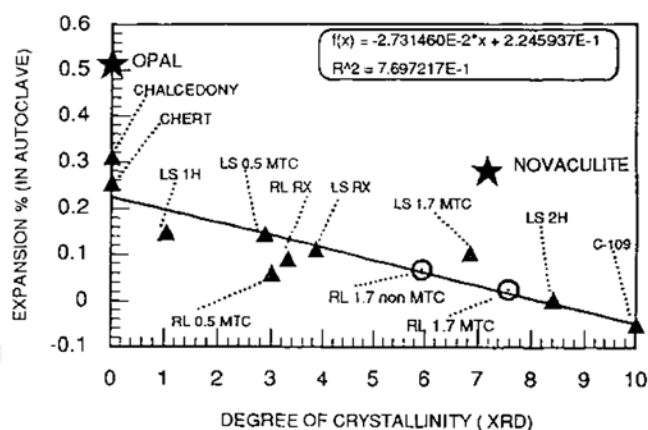
b = ความสูง ณ Peak แรก ที่มุม 2θ ระหว่าง 67 ถึง 69 องศา

Nishiyama *et al.* (1989) ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมและพบว่าค่าดัชนีความเป็นผลึก สามารถใช้บ่งบอกถึงระดับการทำปฏิกิริยาได้ของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาแสดงในภาพที่ 28 เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่มีระดับการทำปฏิกิริยาได้ของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาแตกต่างกัน คือ วัสดุที่ทำปฏิกิริยาได้สูงสุดที่สุดหรือมีระดับความเป็นผลึกต่ำที่สุด หรือมีความเป็นอสัณฐาน เช่น โอปอล มีค่าดัชนีความเป็นผลึก เท่ากับศูนย์และมีความไวต่อปฏิกิริยาสูงมากที่สุด ในขณะที่วัสดุที่มีผลึกไม่สมบูรณ์อื่นๆจะมีค่าดัชนีความเป็นผลึก ต่ำกว่า วัสดุที่เป็นผลึกสูง นอกจากนี้ในกรณีการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่เกิดจากการเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ยังพบว่าวัสดุที่มีค่าดัชนีความเป็นผลึกต่ำมีการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ สูงกว่าวัสดุที่มีค่าดัชนีความเป็นผลึกสูง ดังแสดงในภาพที่ 29 (Sarkar *et al.*, 2001)



ภาพที่ 28 ดัชนีความเป็นผลึก และการสะท้อนของจุดสูงสุดของวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่มีระดับการทำปฏิกิริยาได้ของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาแตกต่างกัน

ที่มา: Thomson and Grattan-Bellew (1993)



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเป็นผลึกและการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์จากการทดสอบด้วยวิธีแรงปฏิบัติการ

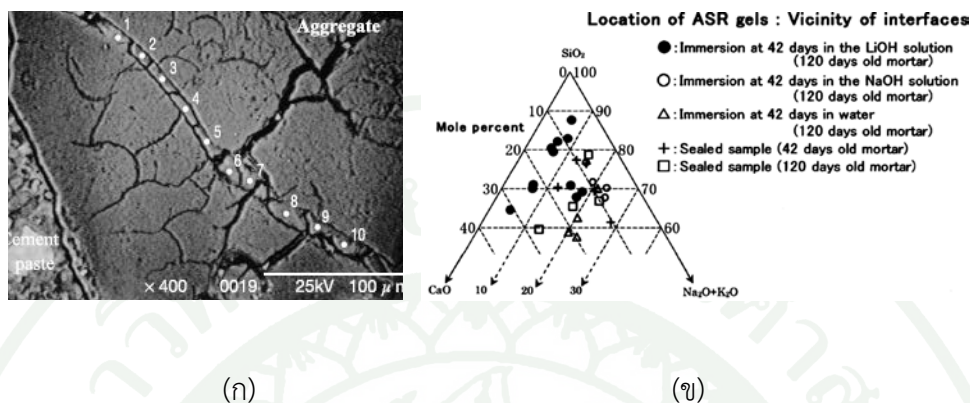
ที่มา: Thomson *et al.* (2001)

2. การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายอิเล็กตรอนเพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ของวัสดุที่กำลังขยายสูง โดยสามารถถ่ายภาพพื้นผิวชิ้นงานที่กำลังขยาย 35 – 200,000 เท่า โดยอาศัยหลักการรวมและเร่งความเร็วของลำอิเล็กตรอนที่หลุดออกจาก Filament ตกกระทบพื้นผิวชิ้นงาน และใช้ร่วมกับ Energy Dispersive Spectrometry (EDS) ที่ใช้ในการวัดการกระจายตัวและสะท้อนกลับของรังสีเอกซ์ ที่สสารแต่ละชนิดจะมีการสะท้อนที่สเปกตรัมพลังงาน (energy spectrum) ที่ต่างกัน จากฐานข้อมูลซอฟต์แวร์ของเครื่องจะสามารถวิเคราะห์สสารในผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้

ความสำคัญของการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้คือองค์ประกอบหลักในผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้แก่ แอลคาไลอ็อกไซด์ (Na_2O และ K_2O) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซิลิกา (SiO_2) ในมวลรวมและบริเวณขอบของปฏิกิริยาจะเป็นตัวบ่งบอกถึงลักษณะของปฏิกิริยาแอลคาไลมวลรวมที่เกิดขึ้นโดยปริมาณผลิตภัณฑ์องค์ประกอบเหล่านี้จะใช้เป็นตัวชี้วัดและวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรที่เปลี่ยนไปในการทดลอง (Aquino *et al.*, 2001) ด้วยวิธีนี้ในการศึกษาของ Kawamura and Kodera (2005) ได้ศึกษาผลกระทบของการเติมสารละลายลิเทียมจากภายนอกต่อการขยายตัว

เนื่องจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ดังแสดงในภาพที่ 30 พบว่าที่บริเวณผิวของตัวอย่างทดสอบมีการลดลงของแอลคาไลซิลิกาเจลเนื่องจากการเติมเข้าไปของสารละลายลิเทียม



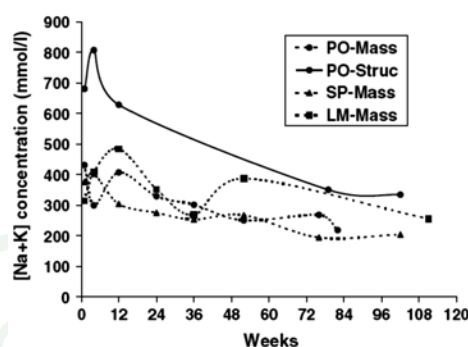
ภาพที่ 30 (ก) SEM ของ แอลคาไลซิลิกาเจล ณ บริเวณผิวของมวลรวม โดยตำแหน่งที่ 1 ถึง 10 เป็นตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ด้วย EDS (ข) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จาก ASR ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน

ที่มา: Kawamura and Kodera (2005)

3. การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารละลาย

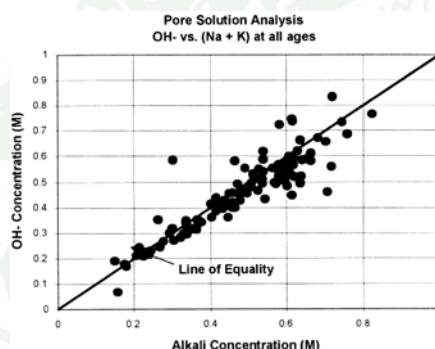
การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารละลายในช่องว่าง (Pore solution composition analysis) เป็นการศึกษาองค์ประกอบของสารละลายในช่องว่างภายในมอร์ตาร์และคอนกรีต โดยการใช้เครื่องมือแรงสูง บีบอัดแท่งตัวอย่างด้วยแรงดันสูงได้สารละลายเพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีต่างๆ เช่น การวิเคราะห์ทางไฟฟ้า (Electroanalytical Methods) การไตเตรท (Titration) แมสสเปกโตรเมทรี (Mass spectrometry) เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเปลวไฟ (Flame photometry) อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic absorption spectroscopy, AAS) เป็นต้น

ภาพที่ 31 แสดงการเปลี่ยนแปลงของระดับความเป็นด่างของสารละลายจากคอนกรีตปรีซีมที่มีค่าลดลงตามเวลาที่ผ่านไป ส่วนในภาพที่ 32 เป็นการศึกษาสารละลายในช่องว่างของเพสต์ด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยเปลวไฟ พบว่าปริมาณไฮดรอกซิลไอออนมีความสมดุลกับปริมาณการกระจายของแอลคาไลในสารละลายในช่องว่างของเพสต์ (Boddy *et al.*, 2000)



ภาพที่ 31 การเปลี่ยนแปลงของระดับความเป็นด่าง (alkalinity) ทั้งปริมาณโซเดียมและโพแทสเซียมในสารละลายในช่องว่างจากคอนกรีตปริซึมในแต่ละช่วงเวลา

ที่มา: Rivard *et al.* (2007)



ภาพที่ 32 ความสมดุลระหว่างไฮดรอกไซด์ในสารละลายในช่องว่างจากมอร์ตาร์บาร์

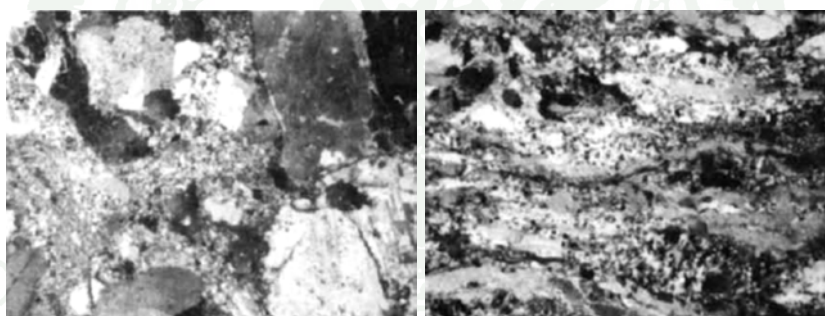
ที่มา: Boddy *et al.*, (2000)

เขตรอยเลื่อนและพฤติกรรมของหินในเขตรอยเลื่อนที่มีต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

เขตรอยเลื่อน (Fault Zone) เป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนที่ของแนวหินขาดออกจากกันอย่างชัดเจน การเลื่อนตัวอาจมีระยะทางตั้งแต่เซนติเมตรจนถึงหลายร้อยกิโลเมตร การเกิดเขตรอยเลื่อนในผิวของระนาบรอยเลื่อน (Fault plane) ส่วนใหญ่เป็นผลของแรงที่เกิดจากกระบวนการแปรสัณฐานหรือกระบวนการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก (Plate tectonics) ซึ่งหินถูกบีบอัดให้ไปอยู่ในที่ที่ทำให้เกิดสภาวะเหมาะสมและสมดุลขึ้นใหม่ การเลื่อนตัวของหินจึงเป็นการ

สูญเสีย ความสามารถในการต่อต้านแรงที่มากระทำ และการปรับสภาพเพื่อให้เกิดความสมดุลใหม่ (เพียงตา, 2009)

การแปรสภาพของหินในเขตรอยเลื่อนทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะพฤติกรรมในระดับขนาดเม็ดหิน (Grain size) และการปรับลดลงของแร่ควอทซ์โดยการเกิดผลึกใหม่เชิงจลน์ (Dynamic recrystallization) ภาพที่ 33 แสดงลักษณะเนื้อหินแกรนิตจากชิ้นตัวอย่างแบบบาง (Thin section) ระหว่างหินที่เก็บจากแหล่งหินที่อยู่นอกเขตรอยเลื่อน (a) และ ภายในรอยเลื่อน (b) โดยมีระยะห่างในการเก็บประมาณ 1000 ฟุต จากภาพหินภายนอกเขตรอยเลื่อนประกอบด้วย ควอทซ์ (Quartz) และ เฟลด์สปาร์ (Feldspar) ในขณะที่หินภายในรอยเลื่อนประกอบด้วย rthomylonite /ultramylonite ตัวอย่างทั้งสองมีความแตกต่างของเม็ดหิน คือ ตัวอย่างภายนอกเขตรอยเลื่อนมีลักษณะเป็นควอทซ์ขนาดใหญ่ (Large quartz) ในขณะที่ตัวอย่างภายในรอยเลื่อนมีลักษณะเนื้อละเอียดและเป็นชั้นลายอย่างเห็นได้ชัด (Prominent foliation) (Kerrick and Hooton, 1992)



(ก)

(ข)

ภาพที่ 33 หินแกรนิตที่เก็บจากแหล่งหิน (ก) ภายนอกเขตรอยเลื่อน และ (ข) ภายในเขตรอยเลื่อน

ที่มา: Kerrick and Hooton (1992)

ผลกระทบจากเพสซิมัม

ผลกระทบจากเพสซิมัม (Pessimism effect) มีหลายกรณีที่คอนกรีตในสภาพแวดล้อมมี แอลคาไลและมวลรวมที่มีปัญหา อาจไม่เกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้ทั้งหมดที่มีแนวโน้มดังกล่าว ทั้งนี้ เนื่องจากในส่วนผสมมีมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ (Reactive aggregate) ปริมาณน้อยเกินไป หรือมากเกินไป ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า “ปริมาณเพสซิมัมของมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้” (Pessimism content

of reactive aggregate) หากระดับแอลคาไลในส่วนผสมคงที่และมีมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ปริมาณน้อยเกินไปแอลคาไลในส่วนผสมก็จะทำปฏิกิริยาได้น้อย ในขณะที่หากมีปริมาณมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้มีมากเกินไปการทำปฏิกิริยาได้ก็จะน้อยเช่นกัน เนื่องจากมีความจำกัดของอัลคาไล ด้วยเหตุดังกล่าวการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาจึงมีจุดสูงสุด ณ ที่ปริมาณมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ ณ จุดที่เหมาะสม ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า “ผลกระทบจากเพสซิมัม” (Crucq, 2005) ดังแสดงในภาพที่ 34

Hobb (1988) ได้จำแนก 4 ช่วงของเส้นโค้งเพสซิมัมไว้ ดังนี้ (Garcia-Diaz, E. *et al.*, 2010)

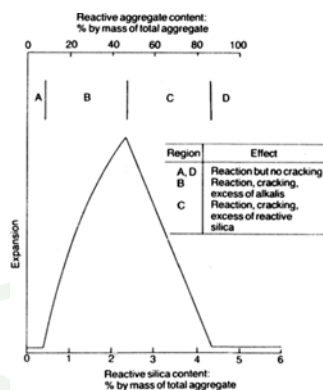
พื้นที่ A และ D เป็นช่วงที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นน้อยเกินไปเนื่องจาก ในกรณีของ A มีมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้จำนวนจำกัด และ ในกรณีของ D ปริมาณแอลคาไลไม่เพียงพอซึ่งเป็นผลให้ปรากฏการณ์การขยายตัวจึงเกิดขึ้นได้น้อย

พื้นที่ B ปฏิกิริยาเกิดมากขึ้นด้วยปริมาณมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้มีมากขึ้น ภายใต้ปริมาณแอลคาไลที่คงที่

พื้นที่ C ปฏิกิริยาเกิดขึ้นด้วยปริมาณมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้มีมากกว่าปริมาณแอลคาไล การขยายตัวมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้

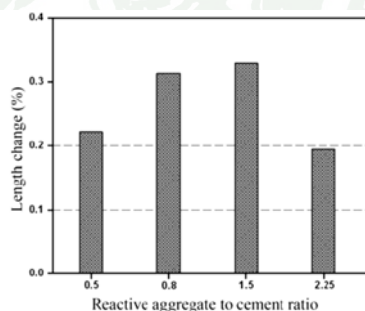
Gillott (1975) ได้ตั้งข้อสังเกตว่าสัดส่วนของเพสซิมัมขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค ปริมาณแอลคาไลและชนิดของมวลรวมและอาจมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง Bektas (2008) ได้รายงานว่ามีมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้บางชนิด เช่น เซิร์ทและโอปอล ไม่ได้แสดงให้เห็นว่ามีการขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ ในขณะที่ Feng et al. (2002) พบว่าสัดส่วนเพสซิมัมของโอปอลและมวลรวมที่มีอัตราการเกิดสัดส่วนเพสซิมัมโดยทั่วไปจะอยู่ที่ต่ำกว่าร้อยละ 10 และอัตราส่วนของมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ต่อปริมาณซีเมนต์เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่บ่งบอกถึงผลกระทบของเพสซิมัม (Jun and Jin, 2009) ดังแสดงในภาพที่ 35

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าที่อัตราส่วนการกระจายตัวของซิลิกาที่ 0.5 หรือ 0.7 ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ratio) จะมีค่าการเกิดชั้นแอลคาไลซิลิกาเจลสูงที่สุด (Kurtis *et al.*, 1998)



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัว และปริมาณมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้

ที่มา: West and Graham (1996)



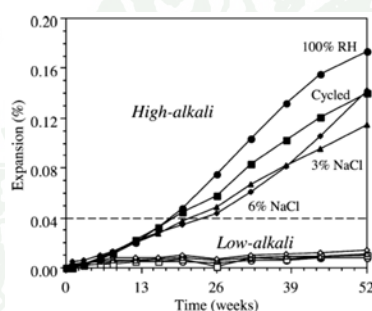
ภาพที่ 35 การขยายตัวของมอร์ตาร์บาร์ที่อัตราส่วนของมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ต่อปริมาณซีเมนต์

ที่มา: Jun and Jin (2009)

รายงานการพบการเกิดผลกระทบของเพสซิมัมสำหรับปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาของหินบางชนิด แต่ในขณะที่ปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอนเนตกลับไม่รายงานผลกระทบของเพสซิมัมแต่อย่างใด (Katayama *et al.*, 2004) ในกรณีของหินปูนที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ และซิลิกา มีกรณีศึกษาสำหรับหินปูนกลุ่มที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก (Siliceous limestone) กล่าวคือมีการเกิดขึ้นผลกระทบของเพสซิมัม เกิดขึ้นคล้ายคลึงกับกรณีของโอปอล (Garcia-Diaz *et al.*, 2010)

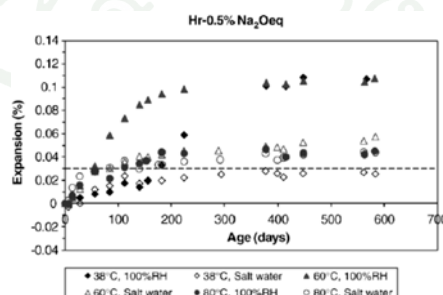
ผลกระทบของคลอไรด์ต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

มีการศึกษาจำนวนหนึ่งที่เสนอว่าการสัมผัสสารละลายของเกลือ หรือน้ำทะเลสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแอลคาไลในคอนกรีตโดยทฤษฎีนี้เสนอว่าค่าความเป็นด่าง (pH) มีค่ามากขึ้นในสารละลายภายในช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) และมีการเพิ่มขึ้นของแอลคาไลในคอนกรีต (Chatterji *et al.*, 1987; Nixon *et al.*, 1988; Kawamura *et al.*, 1989; Kawamura *et al.*, 1994; Sibbick, 1993; Sibbick and Page, 1996 ; Kawamura and Takeuchi, 1996 และ Sacconi *et al.*, 2001) อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยอีกกลุ่มหนึ่งที่พบว่าการลดลงของไฮดรอกซิลไอออน (OH-) อย่างมีนัยสำคัญในมอร์ตาร์บาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อาจเป็นไปได้คลอไรด์ไอออน (Cl-) เร่งปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้หากปริมาณไฮดรอกซิลไอออนยังคงมีอยู่ แต่ก็เป็นไปได้จำกัดในขอบเขตใดขอบเขตหนึ่ง (Kawamura and Igarashi 1990 และ Be'ube' *et al.*, 2003) ดังแสดงในภาพที่ 36 และภาพที่ 37



ภาพที่ 36 การขยายตัวของคอนกรีตในห้องทดสอบ

ที่มา: Be'ube' *et al.* (2003)



ภาพที่ 37 การขยายตัวของคอนกรีตปริมิมจากมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ที่สภาพแวดล้อมต่างกัน

ที่มา: Shayan *et al.* (2010)

อุปกรณ์และวิธีการ

ประกอบด้วยอุปกรณ์และวิธีการทดสอบที่ใช้การศึกษาพฤติกรรมของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาโดยในแต่ละวัตถุประสงค์มีการศึกษาดังนี้

1. การศึกษาอิทธิพลของมวลรวมในเขตรอยเลื่อนที่มีต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ประกอบด้วย
 - การวิเคราะห์ด้วยวิธีสีลาอรรณา
 - การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์
 - การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งคอนกรีตไมโครบาร์
 - การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของคอนกรีตปรีซึม
 - การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล
 - การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปโตดิจิทัล
 - การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
 - การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์
2. การศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เพสซิมัมของมวลรวมเกรย์แวกจากเขตรอยเลื่อน ศึกษาด้วยการทดสอบวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์
3. การศึกษาผลกระทบจากสภาพแวดล้อมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ประกอบด้วย
 - การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของคอนกรีตปรีซึม
 - การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล
 - การวิเคราะห์ด้วยไฟฟ้าออสโน
 - การวิเคราะห์พลาสมาเหนี่ยวนำคู่ควบ
 - การวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
 - การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์

อุปกรณ์

อุปกรณ์ในการศึกษานี้เป็นอุปกรณ์ที่เป็นไปตามมาตรฐานการทดลองดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น เฉพาะที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

1. เครื่องวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ใช้เครื่องวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลิตโดย Bruker รุ่น D4 Endeavor ณ บริษัท สยามวิจัยและนวัตกรรม และ เครื่องวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลิตโดย Rigaku รุ่น MultiFlex, X-Ray Diffraction Instrument ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยฮอกไกโด ประเทศญี่ปุ่น

2. เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของมวลรวมด้วยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอกซ์

ใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของมวลรวมด้วยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ S-4 Tiger ผลิตโดย Bruker ณ บริษัท สยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด

3. การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์

ประกอบด้วย เครื่องเขย่าร้อนมวลรวม เครื่องผสมมอร์ตาร์ แบบหล่อขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร ถึงบรรจุสแตนเลส ถึงบรรจุสแตนเลสทรงกระบอก พร้อมที่ยึดจับทองเหลือง เตาอบควบคุม อุณหภูมิและเครื่องเปรียบเทียบความยาว (Length Comparators) ที่ความยาวอ้างอิง 285 มิลลิเมตร

4. การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งคอนกรีตไมโครบาร์

ประกอบด้วย เครื่องเขย่าร้อนมวลรวม เครื่องผสมคอนกรีต แบบหล่อขนาด 40x40x160 มิลลิเมตร ถึงบรรจุสแตนเลสทรงกระบอกพร้อมที่ยึดจับทองเหลือง เตาอบควบคุมอุณหภูมิและเครื่อง เปรียบเทียบความยาว ที่ความยาวอ้างอิง 160 มิลลิเมตร

5. การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของคอนกรีตปริซึม

ประกอบด้วย เครื่องเขย่าร้อนมวลรวม ชุดทดสอบคุณสมบัติของปฏิกิริยาส่วนผสม คอนกรีต (เพื่อทำการออกแบบส่วนผสม) เครื่องผสมคอนกรีต แบบหล่อขนาด 75x75x285 มิลลิเมตร ถังบรรจุสแตนเลสทรงสี่เหลี่ยม เครื่องเร่งปฏิกิริยาควบคุมอุณหภูมิและความชื้น เครื่องเปรียบเทียบความยาว (Length comparators) และเครื่องวัดหน่วยการยืดหดตัวแบบหลายความยาว (Multi-Length Strain Gauge)

6. กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล

การวิเคราะห์สีลาบรรณาในตัวอย่างแบบบางใช้กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล สำหรับสีลาบรรณา (Petrographic microscope) ผลิตโดย Olympus รุ่น BX-41 ณ ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สามารถใช้ได้ทั้งระบบแสงขนาน และแสงส่องผ่าน (Plane and cross polarization light modes) กำลังขยายที่ 1.25 ถึง 100 เท่า และกล้องกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล สำหรับการวิเคราะห์ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์และคอนกรีตใช้กล้องที่ผลิตโดย Nikon Corporation รุ่น Micropot-FXA ณ บริษัท สยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด

7. กล้องจุลทรรศน์ออปติคัลดิจิทัล

ใช้ในการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการการเคลือบและขัดแล้ว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ออปติคัลดิจิทัล ผลิตโดย Olympus รุ่น DSX500 ณ บริษัท ควอลิตี้รีพอร์ต จำกัด กำลังขยายที่ 100 ถึง 3,000 เท่า และมีค่าการคลาดเคลื่อนของภาพไม่เกินร้อยละ 3

8. เครื่องวิเคราะห์ขั้วไฟฟ้าไอออน

การวิเคราะห์ขั้วไฟฟ้าไอออน (Ion-Selective Electrodes Analysis, ISE) ใช้สำหรับการวัดความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน โดยเครื่อง Metrohm 781 pH/Ion meter ณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐานคลอไรด์เปรียบเทียบกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของสารละลายที่ได้จากตัวอย่างทดสอบ

9. เครื่องวิเคราะห์พลาสมาเหนี่ยวนำคู่ควบ

การวิเคราะห์พลาสมาเหนี่ยวนำคู่ควบ (Inductively Coupled Plasma, ICP) ใช้วัดความเข้มข้นของธาตุนั้นในสารละลายตัวอย่าง โดยเครื่อง ICP ผลิตโดย Agilent รุ่น ICP AES 725 ณ บริษัท สยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด

10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่ผลิตโดย FEI Asia Pacific รุ่น Philips XL 30 ณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการเคลือบและขัดขึ้นตัวอย่างมาแล้วในการศึกษาอิทธิพลของมวลรวมในเขตรอยเลื่อนที่มีต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์

การศึกษาคืออิทธิพลของมวลรวมในเขตรอยเลื่อนที่มีต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในการทดสอบตัวอย่างมอร์ตาร์ ไมโครบาร์ และคอนกรีต ที่ผ่านการเคลือบและขัดขึ้นตัวอย่างมาแล้ว ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่ผลิตโดย JEOL JSM-6380LV Scanning Electron Microscope (SEM) และชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์ OXFORD IE 300 ณ สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

ส่วนการศึกษาลักษณะจากสภาพแวดล้อมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์ ที่ผลิตโดย Shimadzu Corporation รุ่น Superscan SSX-550 ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยฮอกไกโด ประเทศญี่ปุ่น

ภาพอุปกรณ์แสดงใน ภาคผนวก ก

วิธีการ

มีวิธีดำเนินการ ดังนี้

- 1) ประชากร และกลุ่มตัวอย่าง
- 2) การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1. ประชากร และกลุ่มตัวอย่าง

1.1 ประชากรเป้าหมาย (Target Population)

การสำรวจมวลรวมที่มีแนวโน้มทำปฏิกิริยาแอลคาไลมวลรวมได้ในประเทศไทยนั้นจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ามวลรวมมีการตอบสนองต่อปฏิกิริยาแอลคาไลมวลรวมแตกต่างกัน มวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกามากที่สุดคือโอพอลไลน์ซิลิกา แต่มวลรวมชนิดนี้พบน้อยมากในประเทศไทย เช่นเดียวกันกับหินแคลซีไดไนต์ อย่างไรก็ตามในกลุ่มของหินภูเขาไฟสามารถพบได้ทั่วไปในประเทศไทยและบางส่วนมีการนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ หินบะซอลต์ หินไรโอไรท์ และหินแกรนิต ในกลุ่มของหินตะกอน (Sedimentary Rock) ที่มีแนวโน้มทำปฏิกิริยาได้แก่ หินเกรย์แวก หินฟิลไลต์ และหินชีสต์ ตารางที่ 6 แสดงแหล่งหินและปริมาณกำลังการผลิตและสถานะภาพที่อาจมีปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในประเทศไทย และหากพิจารณาถึงจำนวนของแหล่งหินอุตสาหกรรมที่ได้รับประทานบัตรเหมือนหินอุตสาหกรรม พบว่ามีจำนวนแหล่งหินที่อาจมีปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา เป็นกลุ่มประชากรเป้าหมาย 71 แห่ง จากกลุ่มประชากร โรงโม่หินทั่วประเทศ 483 แห่ง โดยเป็นแหล่งหินดังกล่าวมีกำลังการผลิตตั้งแต่ 50 ถึง 500 ตันต่อชั่วโมง

ตารางที่ 6 แหล่งหินที่อาจมีปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในประเทศไทย

ชนิด	ตำแหน่ง	ขนาด (ตัน/ ชั่วโมง)*			รวม
		50 ถึง 149	150 ถึง 200	มากกว่า 200 จำนวน(แห่ง) **	
หินแกรนิต	จ.ชลบุรี		3	6	20
	จ.นราธิวาส		2	2	5
	จ.สงขลา		1		4
	จ.ปัตตานี				2
	จ.ระยอง				2
	จ.ประจวบคีรีขันธ์		1		1

ตารางที่ 6 (ต่อ)

ชนิด	ตำแหน่ง	ขนาด (ตัน/ ชั่วโมง)*			จำนวน(แห่ง) **	รวม
		50 ถึง 149	150 ถึง 200	มากกว่า 200		
หินควอร์ตไซต์	จ.กำแพงเพชร			1	2	2
หินบะซอลต์	จ.บุรีรัมย์		3	4	12	40
	จ.สุรินทร์		4	2	12	
	จ.อุบลราชธานี		2	1	6	
	จ.นครราชสีมา		3		4	
	จ.ศรีสะเกษ	3			3	
	จ.ตราด			1	2	
	จ.เพชรบูรณ์				1	
หินไรโอไลต์	จ.สระบุรี		1		1	1
หินแกรนิต	จ.จันทบุรี				1	1
หินทราย	จ.พัทลุง				1	4
	จ.อุบลราชธานี				1	
	จ.พังงา			1	1	
	จ.อุดรธานี	1			1	
หินแอนดีไซต์	จ.เพชรบูรณ์			2	2	3
	จ.สระบุรี			1	1	
รวม		4	20	15		71

หมายเหตุ: * จำนวนที่จดทะเบียนโรงโม่หิน ** จำนวนที่ได้รับประทานบัตรทั้งหมด

ที่มา: กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553 และ กรม
อุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม, 2553.

1.2 กลุ่มตัวอย่าง

การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่าง หรือ Sampling สำหรับการศึกษาเลือกวิธีการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่าง การสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยมีเงื่อนไขคือ ต้องเป็นแหล่งมวลรวมชนิดที่ในการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า มีแนวโน้มเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ในแหล่งหินจากภูมิภาคต่างๆในประเทศไทย จากกลุ่มประชากรเป้าหมาย 71 แห่ง โดยพิจารณาจาก สมการของ Krejcie and Morgan (1970) ดังสมการ

$$n = \frac{\chi^2 N p (1 - p)}{e^2 \times (N - 1) + \chi^2 p (1 - p)} \quad (11)$$

เมื่อ n = ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง
 N = ขนาดของประชากร
 e = ระดับความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างที่ยอมรับได้
 χ^2 = ค่าไคสแควร์
 p = สัดส่วนของลักษณะที่สนใจในประชากร

สำหรับการศึกษานี้ประชากรที่ใช้ในการวิจัยมีจำนวน 71 หน่วย ยอมรับให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างได้ 7% จาก Chi-Square Distribution ที่ df เท่ากับ 1 ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 90 ได้ $\chi^2 = 2.706$ และสัดส่วนของลักษณะที่สนใจในประชากรเท่ากับ 0.05 ขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการคำนวณได้ดังนี้

$$n = \frac{2.706 \times 71 \times 0.05 \times (1 - 0.05)}{0.05^2 \times (71 - 1) + 2.706 \times 0.05 \times (1 - 0.05)}$$

$$n = 19.35$$

$$n = 19 \text{ ตัวอย่าง}$$

จากจำนวนกลุ่มตัวอย่าง (คิดเป็นร้อยละ 26.76 มากกว่าร้อยละ 25) เลือกเหมืองหินอุตสาหกรรมเพื่อการศึกษาโดยพิจารณาจากแหล่งที่มีแนวโน้มเกิดปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาจากตารางที่ 6 จำนวน 19 ตัวอย่าง แยกตามชนิดหินและภูมิภาคได้ดังตารางที่ 7

จากแหล่งหินที่มีแนวโน้มเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาทำการสำรวจภาคสนาม เก็บตัวอย่างมวลรวมแล้วนำมา และทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ตามมาตรฐาน ASTM C 1260 ได้ผลการขยายตัวที่อายุ 16 วัน หลังจากถอดแบบ (รายละเอียดในภาคผนวก ข) ดังแสดงในตารางที่ 7

จากผลการทดสอบพบว่ามวลรวมที่มีแนวโน้มเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (ASTM C 1260 พิจารณาจากเกณฑ์ ค่าการขยายตัวหลังจากการถอดแบบที่อายุ 16 วันเกินร้อยละ 0.2) ได้แก่ EGW1, EGW2, ELS1, ELS2 และ CRL1 ที่การขยายตัว 0.252, 0.214, 0.324, 0.241 และ 0.226

ตามลำดับ จากนั้นทำการสำรวจภาคสนามอีกครั้งเพื่อเลือกมวลรวมในการศึกษาจากแหล่งทั้ง 5 ดังแสดงในภาคผนวก ค

ตารางที่ 7 กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาแนวโน้มที่อาจมีปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

ลำดับ	รหัส	ภาค	ชนิด	การขยายตัวที่ อายุ 16 วัน
1	ECS1	ตะวันออก	แคลซิลิเกต	-0.009
2	EGN1	ตะวันออก	หินแกรนิต	0.124
3	EGN2	ตะวันออก	หินแกรนิต	0.035
4	EGW1	ตะวันออก	หินแกรย์แวก	0.252*
5	EGW2	ตะวันออก	หินแกรย์แวก	0.214
6	ELS1	ตะวันออก	หินปูน	0.324*
7	ELS2	ตะวันออก	หินปูน	0.241
8	CQZ1	กลาง	หินควอร์ตไซต์	0.010
9	CRL1	กลาง	หินไรโอไลต์	0.226
10	CAS1	กลาง	หินแอนดีไซต์	0.169
11	CAS2	กลาง	หินแอนดีไซต์	0.017
12	CAS3	กลาง	หินแอนดีไซต์	0.075
13	WNS1	ตะวันตก	หินไนท์	0.007
14	NEOS1	ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	หินโอพอลไลน์ซิลิกา	0.049
15	NEBS1	ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	หินบะซอลต์	-0.036
16	NEBS2	ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	หินบะซอลต์	-0.021
17	NEBS3	ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	หินบะซอลต์	-0.015
18	NEBS4	ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	หินบะซอลต์	-0.017
19	NEBS5	ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	หินบะซอลต์	-0.014

ที่มา: * EGW1 และ ELS1 จาก สุวิมล สัจจาณิษฐ์ และคณะ (2556)

จากการสำรวจภาคสนามอีกครั้งพบว่าแหล่งมวลรวม EGW2 มีลักษณะพิเศษกว่าแหล่งมวลรวมอื่นเนื่องจากพบแนวรอยเลื่อนพาดผ่านกลางแหล่งหิน ดังแสดงในภาพที่ 38 ซึ่งการเกิดเขตรอยเลื่อนเป็นผลของแรงที่เกิดจากกระบวนการแปรสัณฐานของแผ่นเปลือกโลก ทำให้หินถูกบีบอัดเคลื่อนไปอยู่ในที่ที่ทำให้เกิดสภาวะเหมาะสมและสมดุลขึ้นใหม่ เกิดการแปรสภาพของหินทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของขนาดเม็ดหิน และการเปลี่ยนแปลงลักษณะผลึก (Recrystallization) ดังที่

ได้กล่าวมาแล้ว ด้วยเหตุนี้จึงตั้งสมมติฐานที่ว่าอาจทำให้มวลรวมในเขตรอยเลื่อนมีการตอบสนองต่อการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาเปลี่ยนไปและยังไม่มีงานวิจัยใดที่จะศึกษาผลกระทบของปัจจัยนี้ในด้านการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในคอนกรีตและเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน

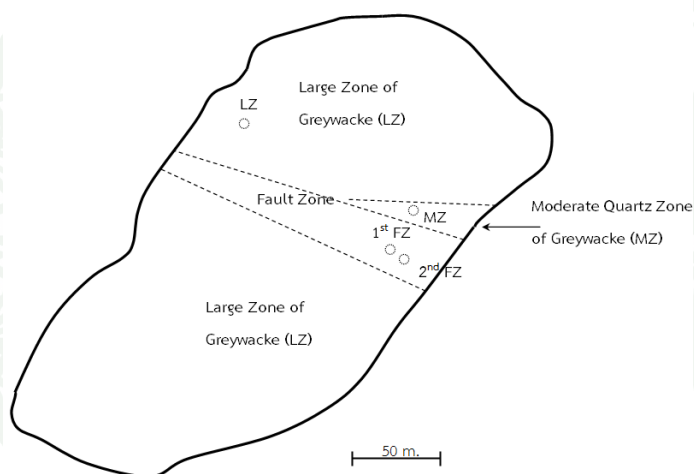
ด้วยเหตุผลนี้งานวิจัยนี้จึงเลือกแหล่งหินนี้ เพื่อการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมระหว่างมวลรวมในแหล่งเดียวกันนี้ ประกอบด้วยมวลรวมตัวอย่าง 3 กลุ่มคือ มวลรวมในแนวเขตรอยเลื่อน (Fault Zone, FZ) มวลรวมบริเวณขอบเขตรอยเลื่อนที่มีควอตซ์ปะปน (Moderate Quartz Zone of Greywacke, MZ) และ มวลรวมหินแกรนัยแควส่วนใหญ่ นอกเขตรอยเลื่อน (Large Zone of Greywacke, LZ) โดยภาพถ่ายดาวเทียมแหล่งมวลรวมแสดงในภาพที่ 39 (ก) และทำการสุ่มตัวอย่างจากจุดที่แสดงใน แผนผังตำแหน่งการเก็บตัวอย่างมวลรวมในภาพที่ 39 (ข) ศึกษาความเหมือนหรือแตกต่างของลักษณะของมวลรวมที่มีต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา



ภาพที่ 38 แนวเขตรอยเลื่อนพาดผ่านแหล่งมวลรวม EGW2



(ก)



(ข)

ภาพที่ 39 (ก) ภาพถ่ายดาวเทียมแหล่งมวลรวม* และ (ข) แผนผังตำแหน่งการเก็บตัวอย่างทดสอบ

ที่มา: *Google Earth

2. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

2.1 การศึกษาอิทธิพลของมวลรวมในเขตรอยเลื่อนที่มีต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

เป็นการศึกษาเปรียบเทียบ (Comparative Studies) พฤติกรรมในการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ระหว่างมวลรวมของแหล่งมวลรวมในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยที่มีเขตรอยเลื่อนพาดผ่านประกอบด้วยตัวอย่าง 3 กลุ่มคือ FZ, MZ และ LZ โดยมีปริมาณ SZ ประมาณร้อยละ 8

MZ ประมาณร้อยละ 2 และ LZ ประมาณร้อยละ 90 ซึ่งประมาณโดยการวัดจากพื้นที่ในสนามและภาพถ่ายดาวเทียม โดยกำหนดขอบเขตรอยเลื่อนมีระยะประมาณ 30 เมตร จากแนวรอยเลื่อนเพื่อศึกษาอิทธิพลจากการปนเปื้อนของมวลรวมในแนวรอยเลื่อน

โดยมวลรวมที่ใช้ในการศึกษานี้จะสุ่มเลือกจากตำแหน่งใกล้เคียงกับจุดการเก็บที่กำหนดด้วยนักธรณีวิทยา และคัดกรองเบื้องต้นที่ละก้อนด้วยแว่นขยาย (Hand Lens) ก่อนทำการเก็บรวบรวมและนำไปย่อยให้มีขนาดที่เป็นไปตามสัดส่วนผสมที่กำหนดในมาตรฐานของมอร์ตาร์และคอนกรีตในการทดสอบต่อไป ลักษณะตัวอย่างมวลรวมในการศึกษานี้แสดงในภาพที่ 40



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 40 ตัวอย่างหิน (ก) FZ (ข) MZ และ (ค) LZ

2.2 การศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เพสซิมัมของมวลรวมเกรย์แวกจากเขตรอยเลื่อน

ทำการศึกษาปรากฏการณ์เพสซิมัมในปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา โดยปรากฏการณ์นี้คือการที่คอนกรีตมีปัจจัยพร้อมที่จะเกิดปฏิกิริยาแอลคาไล แต่ไม่เกิดปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา หรือการขยายตัวสูงสุดเฉพาะกรณีที่มีปริมาณพอเหมาะดังที่กล่าวมาแล้ว (Crucq, 2005) สัดส่วนของเพสซิมัมอาจขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค ปริมาณแอลคาไลและชนิดของมวลรวมและปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง Gillott (1975) และอัตราส่วนของมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ต่อปริมาณซีเมนต์เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่บ่งบอกถึงผลกระทบของเพสซิมัม ดังนั้นวัตถุประสงค์หนึ่งของการศึกษานี้จึงสนใจในผลกระทบของสัดส่วนระหว่างมวลรวมที่มีความแตกต่างกันในระดับการทำปฏิกิริยาได้ที่มีต่อการขยายตัวในลักษณะผลกระทบจากเพสซิมัม โดยกำหนดตัวแปรอัตราส่วนระหว่างมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้และมวลรวมที่ไม่ทำปฏิกิริยาที่ร้อยละ 10:90 20:80 40:60 60:40 80:20 และ 100:0 และทำทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ (AMBT)

2.3 การศึกษาผลกระทบจากสภาพแวดล้อมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

ในการศึกษานี้ใช้การจำลองสภาวะแวดล้อมในการศึกษาผลกระทบของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ให้ตัวแปรความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่แตกต่างกัน ด้วยวิธีเร่งการขยายตัวของแท่งตัวอย่างคอนกรีต เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยแท่งตัวอย่างคอนกรีตปริซึม ขนาด 75x75x285 มิลลิเมตร เช่นเดียวกับการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของคอนกรีตปริซึม (RILEM AAR -4) แต่ใช้สภาวะแวดล้อมในสภาพเร่งมีความแตกต่างกันตามกลุ่มสภาพแวดล้อมแสดงการจำลองสภาวะแวดล้อมภายใต้การแพร่ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในภาพที่ 41 โดยแบ่งออกเป็น 5 สภาวะแวดล้อมดังนี้

1. NA (Normal Accelerated) คือ ตัวอย่างทดสอบด้วยวิธีเร่งการขยายตัวของแท่งตัวอย่างคอนกรีตปริซึมตามปกติ บรรจุในภาชนะรักษาความชื้น ที่มีน้ำอยู่ด้านล่างความลึก 35 ± 5 มิลลิเมตร และวางแท่งคอนกรีตอยู่เหนือน้ำ 15 มิลลิเมตร ศึกษาการขยายตัวรวมของแท่งคอนกรีต

2. CD3 (Chloride Diffusion 3%) คือ ตัวอย่างคอนกรีตปริซึมทดสอบด้วยวิธีเร่งการขยายตัวโดยจุ่มในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 ที่ระดับความลึก 112.5 ± 5 มิลลิเมตร จากด้านล่างของแท่งคอนกรีต จำลองให้เกิดการแพร่ของคลอไรด์ ที่บริเวณใดๆ และมีรายละเอียดดังนี้

บริเวณ 1 จมสารละลายโซเดียมคลอไรด์

บริเวณ 2 จมสารละลายโซเดียมคลอไรด์กึ่งหนึ่ง

บริเวณ 3 บริเวณการแพร่ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

บริเวณ 4 บริเวณการแพร่ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

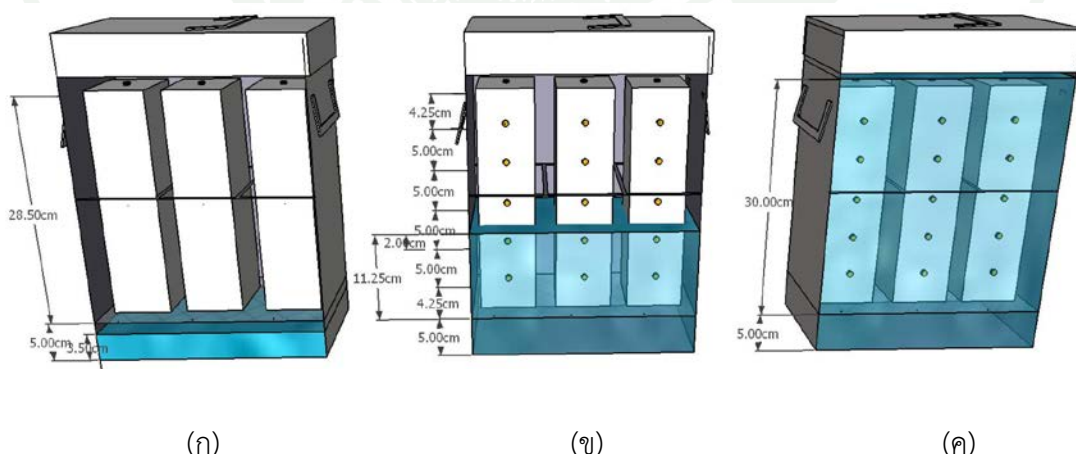
3. CD6 (Chloride Diffusion 6%) คือ ตัวอย่างคอนกรีตปริซึมทดสอบด้วยวิธีเร่งการขยายตัวโดยจุ่มในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 ที่ระดับความลึก 112.5 ± 5 มิลลิเมตร จากด้านล่างของแท่งคอนกรีต จำลองให้เกิดการแพร่ของคลอไรด์ ที่บริเวณ 2 ถึง 4 ทำการศึกษา การขยายตัวรวมของแท่งคอนกรีต และการขยายตัวในแต่ละบริเวณ เช่นเดียวกับ CD3

4. CI3 คือ ตัวอย่างคอนกรีตปริซึมทดสอบด้วยวิธีเร่งการขยายตัวโดยจุ่มในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 ที่สารละลายท่วมแช่ตัวอย่างทั้งหมดที่ระดับความลึก 300 ± 5 มิลลิเมตร จากผิวด้านล่างของแท่งคอนกรีต ทำการศึกษา การขยายตัวรวมของแท่งคอนกรีต

5. CI6 คือ ตัวอย่างคอนกรีตปริซึมทดสอบด้วยวิธีเร่งการขยายตัวโดยจุ่มในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 ที่สารละลายท่วมแช่ตัวอย่างทั้งหมดที่ระดับความลึก 300 ± 5 มิลลิเมตร จากผิวด้านล่างของแท่งคอนกรีต ทำการศึกษา การขยายตัวรวมของแท่งคอนกรีต

หลังการศึกษาการขยายตัวรวมของแท่งคอนกรีตเมื่อครบอายุ 140 วัน จึงทำการศึกษาศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของคลอไรด์ (Cl⁻) การเปลี่ยนแปลงดัชนีผลึก (Crystalline Index) ด้วยการหาค่าประกอบออกไซด์ของมวลรวมด้วยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ และการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนแอลคาไลซิลิกา (Alkali Silica Ratio) ด้วยการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์ เพื่อหาผลกระทบจากการแพร่ของคลอไรด์

ส่วนตัวอย่าง CD3 และ CD 6 นอกจากจะทำการศึกษาศึกษาการขยายตัวรวมของแท่งคอนกรีตแล้วยังทำการศึกษาศึกษาการขยายตัวเฉพาะระยะในแต่ละบริเวณ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน ด้วยวิธีการวิเคราะห์ด้วยไฟฟ้าไอออน และศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอลคาไลไอออน (Na⁺ และ K⁺) ด้วยการวิเคราะห์พลาสมาเหนี่ยวนำคู่ควบ ที่อายุ 35 วัน และ 140 วัน



ภาพที่ 41 การจำลองสภาวะแวดล้อมภายใต้การแพร่ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (ก) NA (ข) CD3 และ CD 6 (ค) CI3 และ CI6

2.4 รายละเอียดการทดสอบ

2.4.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีสัณฐานวิทยา

เป็นการหาแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาของมวลรวมสำหรับการคัดกรองหินเพื่อใช้เป็นมวลรวมผสมคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 295 และ RILEM AAR-1 (American Society for Testing and Materials, 2004, Sim and Nixon 2003) โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของมวลรวม ชนิดและองค์ประกอบแร่ที่มีอยู่ในมวลรวม ด้วยวิธีย่อยๆ ประกอบกันหลายวิธี เช่น การศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์โดยใช้หน้าตัดแบบบาง (Thin Section) การหาองค์ประกอบทางแร่ของมวลรวมด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction Analysis, XRD analysis) การหาองค์ประกอบออกไซด์ของมวลรวมด้วยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry, XRF) การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy Analysis, SEM) การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Microscopic Characteristics Analysis) เป็นต้น

การหาองค์ประกอบทางแร่ของมวลรวมด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เป็นวิธีตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของวัสดุผงที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-Destructive Method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของวัสดุผงตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) (Morris *et al.* 1982) หลักการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นผลึกคือวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะแตกต่างกันไปขึ้นกับธรรมชาติของผลึก เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ ความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานจะสามารถระบุชนิดของแร่ธาตุนั้นๆได้ (Sarkar *et al.*, 2001; Chatterjee, 2001)

การหาค่าประกอบออกไซด์ของมวลรวมด้วยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอกซ์

เป็นการหาค่าประกอบออกไซด์โดยหลักการเรืองแสงภายใต้รังสีเอกซ์ของตัวอย่าง การทดสอบด้วยการยิงรังสีเอกซ์เข้าไปในตัวอย่าง ธาตุต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอกซ์ แล้วคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คาย หรือการเรืองแสง (Fluorescence) ออกมานั้นจะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างนั้นๆ (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2557) ทำให้เราสามารถแยกได้ว่าในตัวอย่างที่ทดสอบนั้น มีธาตุอะไรเป็นองค์ประกอบ ซึ่งพลังงานนั้นจะสะท้อนกลับมายังอุปกรณ์ตรวจจับ (Detector) ที่อยู่ภายในตัวเครื่องมือซึ่งจะตรวจวัดพลังงานที่สะท้อนกลับมา วัดค่าพลังงานที่ออกมาจากตัวอย่างและแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบของข้อมูลดิจิทัลเพื่อส่งให้กับชุดประมวลผล (Central processing unit, CPU) และทำการประมวลผล (Williams and Carter, 1996)

หน้าตัดแบบบาง

ในวิธีศิลปารรณนาจำเป็นต้องเตรียมตัวอย่างหน้าตัดแบบบางเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ตัวอย่างจะตัดด้วยใบตัดเพชรให้มีขนาดเล็กและบาง หลังจากนั้นจึงติดเข้ากับกระจกสไลด์ แล้วฝนด้วยเครื่องฝนจนมีความหนาประมาณ 30 ไมโครเมตร เพื่อให้สามารถมองเห็นการทะลุผ่านและขนานของลำแสงจากกล้องจุลทรรศน์ การเปลี่ยนสีและความเข้มของแสงจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยผู้วิเคราะห์ที่ต้องอาศัยความชำนาญในการเตรียมตัวอย่างและวิเคราะห์ผล ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีลักษณะผลึกที่ทำให้คุณสมบัติทางแสงมีความแตกต่างกัน (Barber, 1981)

การเคลือบและขัดชิ้นตัวอย่าง

หน้าตัดที่ผ่านการเคลือบและขัด (Mounted and Polished Section) ในการศึกษาการเคลือบ (Mount) ใช้วิธีเคลือบเย็น (Cold Mount) ซึ่งเป็นวิธีสำหรับเตรียมชิ้นงานที่มีความดันหรืออุณหภูมิ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวอย่าง หรือชิ้นงานที่เปราะและอาจเกิดการแตกเสียหายได้เมื่อทำการขัดผิวหน้า (Polishing) โดยการนำตัวอย่างไว้ในแบบหล่อ (Mold) จากนั้นเททับด้วย อีพ็อกซี และปล่อยให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง ใช้เวลาระหว่าง 6 ถึง 24 ชั่วโมง แล้วจึงถอดตัวอย่างออกจากแบบนำไปขัดด้วยเครื่องขัดเพื่อให้ผิวหน้ามีความเรียบและสามารถสะท้อน

แสง ที่สามารถเห็นได้ชัดเจนกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการขัด เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ หรือ กล้องภาพถ่ายอิเล็กตรอน (Moreland, 1968)

2.4.2 การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์

วิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ตาม มาตรฐาน ASTM C 1260 และ RILEM AAR-2 (American Society for Testing and Materials, 2004, Sim and Nixon 2000) เป็นการทดสอบเพื่อหาศักยภาพของการขยายตัวจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในส่วนผสมซีเมนต์และมวลรวม ในแท่งมอร์ตาร์ โดยใช้มวลรวมที่มีขนาดคละระหว่าง 150 ไมโครเมตรถึง 4.75 มิลลิเมตร ในกรณีทดสอบมวลรวมหยาบต้องย่อยให้มีขนาดเล็กกว่า 4 มิลลิเมตร แล้วทำการร่อนด้วยตะแกรง เพื่อให้มีขนาดคละตามกำหนด แล้วทำการหล่อด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.47 และสัดส่วนซีเมนต์ต่อมวลรวมที่ 1 ต่อ 2.25 หล่อเป็นแท่งมอร์ตาร์ขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร ทำการถอดแบบที่อายุ 24 ± 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส โดยป้องกันจากการสูญเสียความชื้นและน้ำหนักตลอดระยะเวลา แช่ตัวอย่างในภาชนะบรรจุน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 80 ± 2.0 องศาเซลเซียส จนครบ 24 ± 2 ชั่วโมง อ่านค่าบาร์อ้างอิงแล้วจึงทำการวัดค่าความยาวเริ่มต้นทันทีที่ตัวอย่างแห้ง จากนั้นจึงทำการเร่งปฏิกิริยาด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 N (NaOH 1 N) อุณหภูมิ 80 ± 2 องศาเซลเซียส อ่านค่าความยาวเปรียบเทียบเป็นระยะๆ ในเวลาสำหรับ 3 ถึง 16 วัน (ASTM C 1260 AASHTO T303 และ RILEM AAR-2) ถึง 12 เดือน (ASTM C227)

2.4.3 การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งคอนกรีตไมโครบาร์

วิธีนี้มีขั้นตอนคล้ายคลึงกับการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แต่มีขนาดของมวลรวมและตัวอย่างที่ต่างกันคือมวลรวมขนาด 5-10 มิลลิเมตร และแท่งตัวอย่าง $40 \times 40 \times 160$ มิลลิเมตร อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.33 หลังผสมทำการถอดแบบที่อายุ 24 ± 2 ชั่วโมง อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส โดยป้องกันจากการสูญเสียความชื้นและน้ำหนักตลอดระยะเวลา แช่ตัวอย่างในภาชนะบรรจุน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 80 ± 2 องศาเซลเซียส จนครบ 24 ± 2 ชั่วโมง แล้วจึงทำการวัดค่าความยาวเริ่มต้นทันทีที่ตัวอย่างแห้ง โดยอุปกรณ์การวัดต้องตรวจสอบกับบาร์อ้างอิงก่อนทุกครั้ง หลังจากนั้นจึงนำไปแช่ในสารละลาย NaOH 1 N ที่ 80 องศาเซลเซียส โดยทำการวัดความยาวเป็นระยะเมื่อครบอายุ 4 สัปดาห์ หากมีการขยายตัวเกินกว่า 0.1% ถือว่ามวลรวมนั้นเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

2.4.4 การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของคอนกรีตปรีซึม

โดยคอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์ 440 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบ 4 ต่อ 6 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.50 และควบคุมปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เทียบเท่าที่ร้อยละ 1.25 หล่อแท่งคอนกรีตขนาด 75x75x285 มิลลิเมตร หลังผสมทำการถอดแบบที่อายุ 24 ± 2 ชั่วโมง อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส โดยป้องกันจากการสูญเสียความชื้นและน้ำหนัก หลังจากทำการวัดค่าความยาวเริ่มต้น บรรจุในภาชนะที่มีน้ำอยู่ด้านล่างความลึก 35 ± 5 มิลลิเมตร วางแท่งคอนกรีตอยู่เหนือน้ำ 15 มิลลิเมตร ปิดภาชนะให้สนิท เก็บในตู้เร่งปฏิกิริยา (Reactor Generating) น้ำที่อุณหภูมิ 60 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 เมื่อครบอายุที่จะทำการอ่านค่าให้ทำการเย็นตัว (Cool Down) ก่อนเปิดฝาภาชนะ โดยนำภาชนะบรรจุตัวอย่างเก็บที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ± 2 ชั่วโมง แล้วจึงเปิดฝาภาชนะ ทำการวัดค่าความยาวที่อายุ 5, 10, 15, 25 และ 30 สัปดาห์ ตลอดการทดสอบต้องควบคุมระดับน้ำในภาชนะบรรจุตัวอย่าง และตู้เร่งปฏิกิริยา เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่าง

2.4.5 การศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล

ในการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (Digital Microscopic Characteristics Analysis) ใช้ตัวอย่างหน้าตัดแบบบาง ตัวอย่างหน้าตัดเคลือบและขัด จากตัวอย่างคอนกรีตไมโครบาร์ และคอนกรีตปรีซึมเพื่อศึกษาลักษณะรายละเอียดและ ASR-gel ที่ขอบของหรือในมวลรวม หรือในเมทริกซ์และลักษณะการเกิดรอยร้าวในตัวอย่าง

2.4.6 การศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปโตดิจิทัล

กล้องจุลทรรศน์ออปโตดิจิทัล (Opto-Digital Microscope) เป็นวิธีทดสอบใหม่สำหรับกล้องจุลทรรศน์อุตสาหกรรม ใช้ในการวิเคราะห์ถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างที่กำลังความละเอียดสูงทั้งระบบ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยสามารถใช้ได้กับตัวอย่างทุกชนิด เนื่องจากไม่ต้องมีขั้นตอนเตรียมตัวอย่าง สามารถใช้ได้กับ ตัวอย่างแบบบาง ตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบและขัดชิ้นตัวอย่าง หรือตัวอย่างหน้าตัดแบบแตกหัก (Broken Surface) ได้ทั้งหมด

2.4.7 การวิเคราะห์ขั้วไฟฟ้าไอออน

การวิเคราะห์ขั้วไฟฟ้าไอออน (Ion-Selective Electrodes Analysis, ISE) เป็นการตรวจสอบ ไอออนที่ละลายในสารละลาย ตามมาตรฐาน ASTM D512 (Standard test methods for chloride ion in water; test method C/Ion-Selective Electrode Method) สำหรับการศึกษานี้ทดสอบเฉพาะกรณีวัดความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน จากการละลายผงคอนกรีตที่เจาะจากแท่งตัวอย่างที่ผ่านการจำลองสภาวะแวดล้อมการแพร่ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ระดับความลึก 10 และ 20 มิลลิเมตร หลังจากนั้นชั่งผงคอนกรีตให้มีปริมาณประมาณ 5 กรัม ผสมผงคอนกรีตในน้ำกลั่นแบบปราศจากประจุ (Deionized Water) ปริมาตร 75 มิลลิลิตร แช่ผงนี้ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง $\pm$ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 25 ± 5 องศาเซลเซียส กรองผ่านด้วยกระดาษกรองก่อนที่จะวัดความเข้มข้นของคลอไรด์ ด้วยเครื่อง Metrohm 781 pH/Ion meter ตรวจวัดไอออนโดยใช้เส้นโค้งมาตรฐานที่สร้างขึ้นจากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐานคลอไรด์ที่ทราบค่าความเข้มข้นที่แน่นอน เปรียบเทียบกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของสารละลายคลอไรด์ที่ต้องการหาปริมาณไอออนที่อุณหภูมิและสภาวะทดสอบเดียวกัน

2.4.8 การวิเคราะห์พลาสมาเหนี่ยวนำคู่ควบ

การวิเคราะห์พลาสมาเหนี่ยวนำคู่ควบ (Inductively coupled plasma, ICP) เป็นหนึ่งในวิธีการวิเคราะห์ธาตุ (Elemental Analysis) โดยใช้พลังงานจากพลาสมาเหนี่ยวนำคู่ควบที่อุณหภูมิสูงกว่า 10,000 องศาเซลเซียส ซึ่ง ณ จุดดังกล่าวอะตอมของธาตุต่างๆ เปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นฐาน (Ground state) มาอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) หรือเป็นไอออน เมื่ออะตอมของธาตุมีการลดระดับพลังงานจากสถานะกระตุ้นกลับมายังสถานะพื้นฐาน อะตอมของธาตุจะปล่อยพลังงานออกมาเรียกว่า “Emission” ซึ่งในแต่ละธาตุมีความยาวคลื่นของพลังงานที่ปล่อยออกมาเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว และมีความเข้มข้น (Intensity) เป็นสัดส่วนแปรผันตรงกับความเข้มข้นของธาตุนั้นในสารละลายของสารตัวอย่าง การวิเคราะห์เชิงปริมาณสำหรับธาตุต่างๆ (Quantitative analysis) ทำได้โดยการเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐานของธาตุต่างๆ (Standard Solution) ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน (Prichard, 1996)

2.4.9 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เป็นการใช้กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสงแทนแสงธรรมชาติ ซึ่งสามารถใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และกล้องจุลทรรศน์แบบแสงไม่สามารถทำได้ สำหรับการศึกษาชิ้นก่อนการศึกษาดังนี้ตัวอย่างต้องมีการเคลือบและขัดชิ้นตัวอย่างเพื่อให้สามารถเห็นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมและเมทริกซ์ที่เกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้ชัดเจน

2.4.10 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์ (Scanning electron microscope/Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, SEM/EDS) เป็นการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ประกอบกับชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDS) โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเลือกจุดสนใจที่จะทำการวิเคราะห์ แล้วทำการยิงรังสีเอกซ์ (X-ray) พลังงานสูงวิ่งเข้าชนตัวอย่าง ณ จุดนั้น ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ ในตัวอย่างได้พลังงานจนทำให้หลุดออกจากวงโคจร แล้วอิเล็กตรอนจากชั้นถัดไปเข้ามาแทนที่พร้อมกับปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมาสามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ ซึ่งวิธีทดสอบนี้มีความสำคัญต่อการระบุผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ณ จุดที่เกิดปฏิกิริยาได้โดยตรงซึ่งวิธีอื่นๆไม่สามารถทำได้

ผลและวิจารณ์

ผลการศึกษาศึกษาพฤติกรรมของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ในแต่ละวัตถุประสงคมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การศึกษาอิทธิพลของมวลรวมในเขตรอยเลื่อนที่มีต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

1. การวิเคราะห์ด้วยวิธีซิลารรณ

1.1 การหาองค์ประกอบออกไซด์ของมวลรวมด้วยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอกซ์

ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบออกไซด์ของมวลรวมด้วยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ ทั้ง 3 กลุ่ม คือ FZ, MZ และ LZ แสดงในตารางที่ 8 FZ, MZ และ LZ มีความคล้ายคลึงกันในองค์ประกอบออกไซด์ คือ ทั้งสามมวลรวมมี ซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก ที่ร้อยละ 56-60 อะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 13-18 เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 5-6% และแคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 3-7 องค์ประกอบบางอย่างมีความแตกต่างกันค่อนข้างชัดเจนระหว่างกลุ่มมวลรวมในเขตรอยเลื่อน (FZ) และนอกเขตรอยเลื่อน (MZ, LZ) เช่นการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมออกไซด์ โซเดียมออกไซด์ และการลดลงของโปตัสเซียมออกไซด์ แม้การเปลี่ยนแปลงนี้จะไม่มากนัก

1.2 การหาองค์ประกอบทางแร่ของมวลรวมด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของมวลรวมด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (รายละเอียดในภาคผนวก ง) แสดงในตารางที่ 9 มวลรวมทั้งสามชนิดมีองค์ประกอบหลักของ Quartz ใกล้เคียงกันคือระหว่างร้อยละ 30 ถึง 32 แต่แตกต่างกันในองค์ประกอบแร่ Muscovite ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$) ที่ FZ มีค่าสูงกว่าคือร้อยละ 32 ในขณะที่ MZ และ LZ มีองค์ประกอบไม่เกินร้อยละ 15 (MZ มี Muscovite เป็นองค์ประกอบร้อยละ 8 LZ มีร้อยละ 13) ในขณะที่ MZ และ LZ มี Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) เป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 30 (MZ มี Albite เป็นองค์ประกอบร้อยละ 36 LZ มีร้อยละ 32) ในขณะที่ FZ มี Albite เป็นองค์ประกอบเพียงร้อยละ 7 นอกจากนี้หากพิจารณาเป็นกลุ่มในเขตรอยเลื่อน (FZ) และนอกเขตรอยเลื่อน (MZ และ LZ) แล้วยังเห็นได้ว่าแร่ธาตุบางชนิดทั้งสองกลุ่มแตกต่างกัน เช่น ปริมาณ Calcite Kaolinite และ Clinocllore ซึ่งแสดงถึงผลจากความเปลี่ยนแปลงของหินที่มาจากกลุ่มเดียวกัน ซึ่งมีความแตกต่างจากการทดสอบหา

องค์ประกอบออกไซด์ของมวลรวมด้วยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ซึ่งองค์ประกอบออกไซด์ค่อนข้างใกล้เคียงกัน

นอกจากนี้ Muscovite ที่มีระบบผลึกเป็น Monoclinic ที่เป็นแบบระนาบโดยสามารถทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าระบบผลึกของ Albite ที่มีระบบผลึกแบบ Triclinic ที่เป็นแบบลูกบาศก์ นอกจากนี้ความผูกพันของ Muscovite ยังมีสูงกว่า Albite เมื่อพิจารณาจากค่า โดยพบว่า Mohs Hardness ของ Muscovite มีค่าระหว่าง 2.00-2.25 ต่ำกว่า Albite ที่มีค่าระหว่าง 6 - 6.5 อย่างเห็นได้ชัด นั้นหมายความว่าเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางแร่ ในกรณีของมวลรวม FZ มีชนิดและระบบผลึกความแตกต่างจาก MZ และ LZ (Downs, 2006)

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของมวลรวมด้วยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ (XRF)

องค์ประกอบออกไซด์		FZ	MZ	LZ
Silicon dioxide	(SiO ₂)	56.48	60.21	58.22
Aluminum oxide	(Al ₂ O ₃)	18.64	13.41	13.93
Iron oxide	(Fe ₂ O ₃)	5.29	5.99	6.11
Calcium oxide	(CaO)	3.21	7.46	6.96
Magnesium oxide	(MgO)	1.9	2.45	2.53
Sulfur trioxide	(SO ₃)	0.38	0.18	0.24
Sodium oxide	(Na ₂ O)	1.15	3.46	3.08
Potassium oxide	(K ₂ O)	3.39	0.83	1.32
Titanium dioxide	(TiO ₂)	0.82	0.5	0.55
Phosphorus pentoxide	(P ₂ O ₅)	0.23	0.12	0.11
Manganese oxide	(MnO)	0.07	0.14	0.1
Strontium oxide	(SrO)	0.05	0.06	0.04
Loss on Ignition	(LOI)	8.36	5.17	6.77
Sum		100.00	100.00	100.00

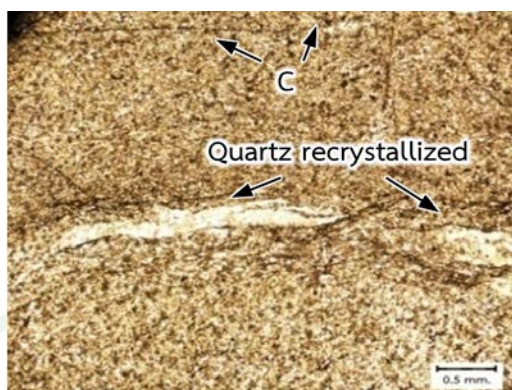
ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของมวลรวมด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

องค์ประกอบทางแร่	FZ	MZ	LZ
Calcite	0.32	7.41	8.33
Quartz	32.34	31.38	30.42
Dolomite	8.18	-	-
Kaolinite	9.55	0.45	1.52
Muscovite	31.92	8.29	13.11
Microcline	6.18	6.31	4.20
Albite	7.05	36.17	32.09
Clinochlorite	4.46	9.99	10.33
Sum	100.00	100.00	100.00

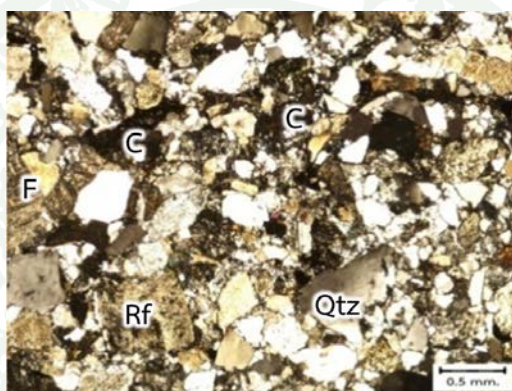
1.3 การวิเคราะห์หน้าตัดแบบบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล

การวิเคราะห์ตัวอย่างหน้าตัดแบบบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลกำลังขยายที่ 40 เท่า สำหรับเทคนิคสีลาอรรณา พิจารณาลักษณะทางกายภาพของมวลรวมโดยระบบแสงขนาน และแสงส่องผ่าน (Plane and cross polarization light modes) แสดงในภาพที่ 42 พบว่ามวลรวมทั้ง 3 มีความแตกต่างกันทางกายภาพ โดยเฉพาะในกรณี FZ ที่แตกต่างจาก MZ และ LZ อย่างเห็นได้ชัด

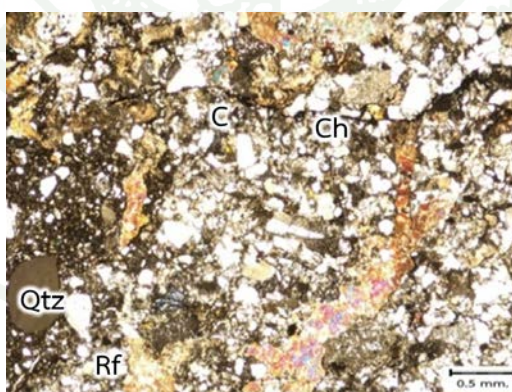
มวลรวม FZ ประกอบด้วย Quartz, Clay/Graphite และ Rock Fragments เห็นชัดว่ามีลักษณะที่ถูกบีบอัดด้วยแรง Tectonic Forces ทำให้เกิด “Recrystallization Quartz Grains” ขึ้นภายใน โดยเป็นการแปรรูปแบบเปราะ (Brittle Deformation) ทำให้ Quartz เม็ดละเอียดมาก จากการวิเคราะห์ขนาดเม็ดเกรนด้วยวิธีวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย (Image Analysis) พบว่ามีอนุภาค quartz ขนาด Grain size ขนาดเฉลี่ยประมาณ 11 ไมโครเมตร และขนาดใหญ่สุดประมาณ 85 ไมโครเมตร จัดเป็น Microcrystalline/Cryptocrystalline matrix ที่มี clay/graphite แทรกอยู่ภายใน matrix และอาจทำให้มวลรวมชนิดนี้มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้สูง เมื่อพิจารณาถึง RILEM-AAR1 (Sims and Nixon, 2003) มวลรวมในกลุ่ม FZ นี้จึงจัดอยู่ในประเภท Class III “very likely to be alkali-reactive”



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 42 การวิเคราะห์ทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ ของตัวอย่างหน้าตัดแบบบาง

(ก) FZ (ข) MZ (ค) LZ

หมายเหตุ: Qtz = Quartz, F = Feldspar, Ch = Chlorite, Rf = Rock fragment และ C = Clay

มวลรวม MZ เป็นหินเกรย์แวค ชนิด coarse-grained greywacke ประกอบด้วย quartz, feldspar, clay/graphite และ rock fragments โดยมีขนาดของเม็ดแร่ที่ใหญ่กว่า LZ พบอนุภาค high weathering ปรากฏอยู่ทั่วไป และมีอนุภาค quartz crystalline กระจายอยู่ทั่วไปในเมทริกซ์ ขนาด Grain size เฉลี่ยประมาณ 15 ไมโครเมตร และขนาดใหญ่สุดประมาณ 740 ไมโครเมตร จัดอยู่ในประเภท Class II “alkali-reactivity uncertain”

มวลรวม LZ เป็นหินเกรย์แวค ที่ประกอบด้วย quartz crystalline/microcrystalline, feldspar, clay/graphite, rock fragments และมี chlorite ประกอบอยู่บ้าง และยังพบอนุภาค high weathering ปรากฏอยู่ทั่วไปในมวลรวมชนิดนี้ เช่นเดียวกับ MZ โดยอนุภาค quartz ขนาด Grain size เฉลี่ยประมาณ 14 ไมโครเมตร และขนาดใหญ่สุดประมาณ 630 ไมโครเมตร และจัดอยู่ในประเภท Class II “alkali-reactivity uncertain”

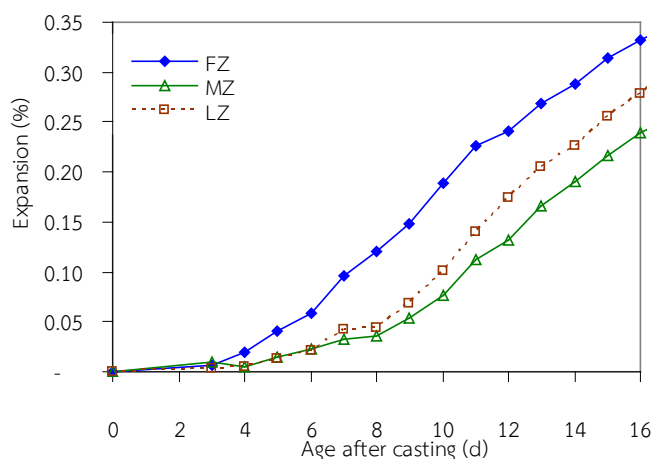
จากผลการทดสอบนี้พบว่า มวลรวม FZ (อยู่ใน Class III) มีแนวโน้มเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาสูงกว่ามวลอื่นๆ ในแหล่งเดียวกันที่อยู่ใน Class II

2. การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์

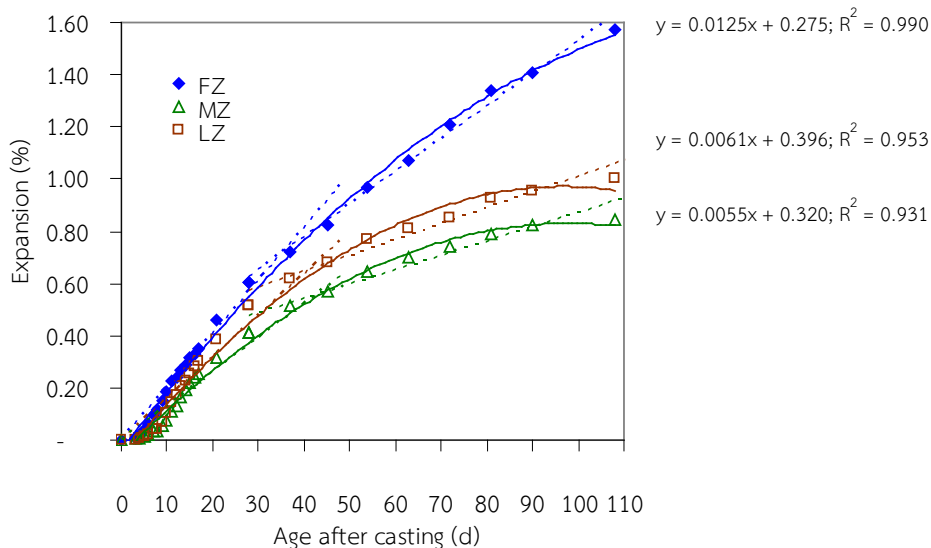
จากการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ ดังแสดงค่าเฉลี่ยผลการทดสอบจากชุดตัวอย่าง 3 ชิ้น ในภาพที่ 43 (ก) (รายละเอียดในตารางผนวกที่ จ1) พบว่ามวลรวม FZ มีค่าการขยายตัวสูงกว่า LZ และ MZ อย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาถึงเกณฑ์ตัดสินการเกิดปฏิกิริยาที่อายุ 16 วันหลังจากถอดแบบพบว่า การขยายตัวของ FZ มีค่าการขยายตัวสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 0.333 สูงกว่า MZ และ LZ ที่มีการขยายตัว เท่ากับร้อยละ 0.238 และ 0.279 ตามลำดับ โดยการขยายตัวของมวลรวม FZ มีการขยายตัวสูงกว่า MZ และ LZ คิดเป็นร้อยละ 40 และร้อยละ 19 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ามวลรวมทั้งสามที่เป็นหินเกรย์แวคมีค่าการขยายตัวสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 1260 (สูงกว่าร้อยละ 0.2 สำหรับมวลรวมที่มีแนวโน้มเกิดการเสื่อมสภาพด้วยปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา)

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงการขยายตัวต่อเนื่องที่อายุการทดสอบในระยะยาว ดังแสดงในภาพที่ 43 (ข) พบว่ามวลรวม FZ MZ และ LZ ยังมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยพบว่าที่อายุ 108 วัน การขยายตัวของ FZ MZ และ LZ มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.57, 0.85 และ 1.00 ตามลำดับ และ FZ มีการขยายตัวสูงกว่า MZ และ LZ คิดเป็นร้อยละ 86 และร้อยละ 57 นอกจากนี้หากพิจารณาถึง

ความสัมพันธ์ในสมการเชิงเส้นที่อายุ 28 วันขึ้นไป พบว่า FZ มีความชันสูงที่สุดที่ 0.0125 ($R^2 = 0.990$) เมื่อเปรียบเทียบกับ MZ ที่มีความชันของการขยายตัว 0.0055 ($R^2 = 0.931$) และ LZ เท่ากับ 0.0061 ($R^2 = 0.953$) นั่นหมายความว่า หลังอายุ 28 วันขึ้นไป FZ มีอัตราการขยายตัวสูงกว่ามวลรวมที่เหลือ



(ก)



(ข)

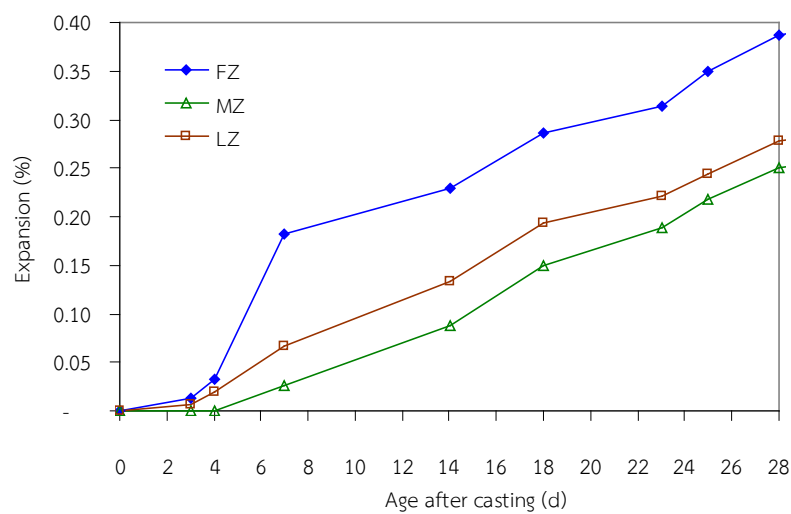
ภาพที่ 43 ค่าเฉลี่ยการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่อายุ (ก) 16 วัน หลังถอดแบบ และ (ข) 108 วัน หลังถอดแบบ

3. การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งคอนกรีตไมโครบาร์

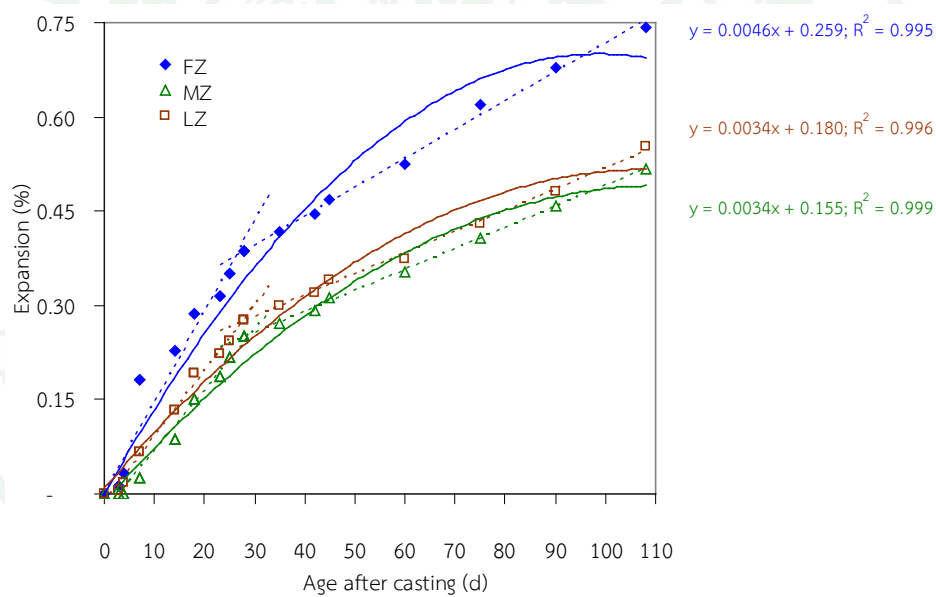
ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งคอนกรีตไมโครบาร์ ที่อายุ 28 วันหลังถอดแบบ ในภาพที่ 44 (ก) (รายละเอียดในตารางผนวกที่ จ2) พบว่ามวลรวม FZ มีค่าการขยายตัวสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 0.387 LZ มีการขยายตัวรองลงมาที่ร้อยละ 0.278 ในขณะที่ MZ มีการขยายตัวที่ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 0.251 และ FZ มีค่าการขยายตัวสูงกว่า LZ และ MZ ที่ร้อยละ 40 และ 55 ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม RILEM AAR-5 ได้แนะนำว่าให้ใช้การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งคอนกรีตไมโครบาร์สำหรับคัดกรองมวลรวมที่อาจมีปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอนेटโดยให้เกณฑ์ตัดสินว่ามวลรวมนั้นทำปฏิกิริยาได้หรือไม่ตามประสบการณ์แต่ละท้องถิ่นหรือประเทศนั้นๆ เบื้องต้น และได้ให้ข้อมูลสำหรับเกณฑ์ตัดสินที่ใช้ประเทศจีน ซึ่งกำหนดการขยายตัวที่ 28 วันไม่เกินร้อยละ 0.1 ถึงจะถือว่าไม่เกิดปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอนेट (Nixon and Sim, 2000; Sommer *et al.*, 2005) ในส่วนปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา นั้น NRCC-46876 (National Research Council, Canada) ได้เสนอวิธีนี้เพื่อใช้ทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาและปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอนेटร่วมกัน โดยมีเกณฑ์ตัดสินต่างกันคือไม่เกินร้อยละ 0.14 สำหรับ Siliceous Limestone และการขยายตัวไม่เกินร้อยละ 0.04 สำหรับมวลรวมชนิดอื่นๆ (Grattan-Bellew, 2003) และผลการทดลองมวลรวมทุกชนิดในการศึกษานี้ มีค่าการขยายตัวสูงกว่าทุกเกณฑ์ที่ได้กล่าวมา

การทดสอบในระยะยาวที่ อายุ 108 ดังแสดงในภาพที่ 44 (ข) พบว่ามวลรวม FZ MZ และ LZ หลังอายุ 28 วัน ตัวอย่างไมโครบาร์ ยังมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ ที่อายุ 108 วัน การขยายตัวของ FZ มีค่าการขยายตัวสูงที่สุดที่ร้อยละ 0.743 ส่วนมวลรวม LZ มีค่าการขยายตัวรองลงมาที่ร้อยละ 0.554 และ มวลรวม MZ มีค่าการขยายตัวร้อยละ 0.517 เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ในสมการเชิงเส้นที่อายุ 28 วันขึ้นไป พบว่า FZ มีอัตราการขยายตัว (พิจารณาจากค่าความชันของสมการ) สูงที่สุดเท่ากับ 0.0046 (R Square = 0.995) เมื่อเปรียบเทียบกับ MZ และ LZ ที่มีความชันของการขยายตัวเท่ากันเท่ากับ 0.0034 (R Square ของ MZ เท่ากับ 0.999 และ LZ เท่ากับ 0.996) นั่นคือหลังอายุ 28 วัน FZ ยังคงมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องและมีอัตราการขยายตัวสูงสุด



(ก)



(ข)

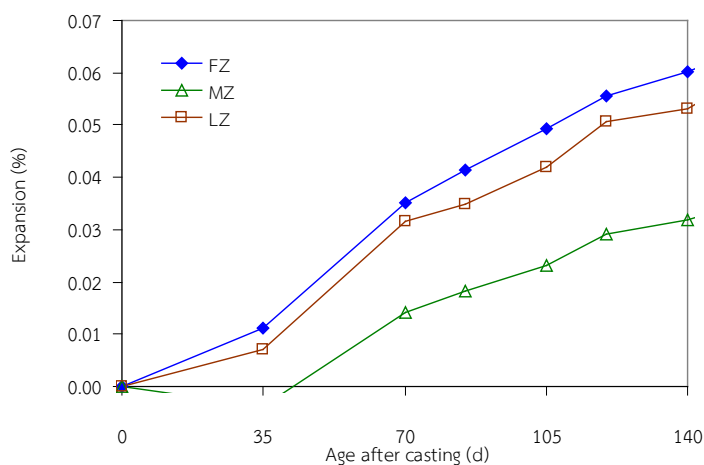
ภาพที่ 44 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบด้วยวิธีแรงปฏิบัติการขยายตัวของแท่งคอนกรีตไมโครบาร์
(ก) ที่อายุ 28 วัน หลังถอดแบบ และ (ข) 108 วันหลังถอดแบบ

4. การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของคอนกรีตปรีซึม

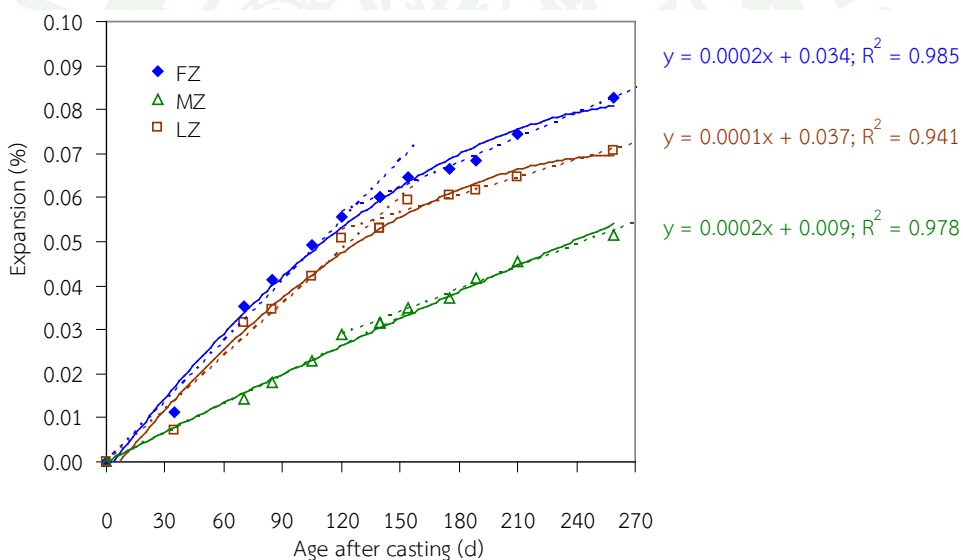
ภาพที่ 45 (ก) แสดงค่าเฉลี่ยผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งคอนกรีตปรีซึม ที่อายุ 140 วัน (รายละเอียดในตารางผนวกที่ จ3) จากผลการทดสอบพบว่ามวลรวม FZ มีค่าการขยายตัวสูงสุด โดยมีค่าการขยายตัวที่ อายุ 140 วัน หลังการถอดแบบเท่ากับร้อยละ 0.060 ในขณะที่ LZ มีการขยายตัวลดลงมาที่ร้อยละ 0.053 และ MZ มีการขยายตัวที่ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 0.032 สอดคล้องกันกับการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ และการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งคอนกรีตไมโครบาร์ โดย FZ มีค่าการขยายตัวสูงกว่า LZ และ MZ ที่ร้อยละ 13 และ 88 ตามลำดับ

ในส่วนของการกำหนดมาตรฐานการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของคอนกรีตปรีซึม สำหรับ RILEM AAR-4 นี้ไม่ได้ระบุเกณฑ์ที่แน่ชัดเช่นเดียวกับ RILEM AAR-5 (RILEM AAR-4 ยังอยู่ในระหว่างการเตรียมการสรุปรายงานและเผยแพร่) อย่างไรก็ตาม Fournier *et al.* (2004) ได้แนะนำว่าควรใช้เกณฑ์การขยายตัวที่ 3 เดือน ไม่เกินร้อยละ 0.04 ส่วน Touma *et al.* (2001) ก็ได้เสนอเกณฑ์สำหรับวิธีนี้ไว้ที่ การขยายตัวที่ 6 เดือน ไม่เกินร้อยละ 0.04 โดยทั้งสองการศึกษา อ้างอิงผลการทดสอบวิธีนี้เข้ากับวิธีการขยายตัวของคอนกรีตปรีซึม (Concrete prism test, CPT; ASTM C 1293, CSA A23.2-14A และ RILEM AAR-3) เพื่อให้ได้เกณฑ์การขยายตัวนี้ ซึ่งมวลรวม FZ และ LZ ต่างก็มีค่าการขยายตัวมากกว่าข้อเสนอดังกล่าวตั้งแต่อายุ 4 เดือน ส่วนมวลรวม MZ อาจมีพฤติกรรมในการทำปฏิกิริยาแบบปานกลาง (Moderate) ซึ่งต้องพิจารณาผลการทดสอบในระยะยาวต่อไป

การทดสอบในระยะยาวที่ อายุ 259 วัน แสดงในภาพที่ 45 (ข) พบว่ามวลรวม FZ MZ และ LZ หลังอายุ 140 วัน ตัวอย่างไมโครบาร์ ยังมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง และการขยายตัวของ FZ มีค่าการขยายตัวมากที่สุดตามด้วยมวลรวม LZ และ MZ ตามลำดับ โดย FZ มีค่าการขยายตัวเท่ากับ 0.083 ส่วน มวลรวม LZ มวลรวม MZ มีค่าการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.071 และ 0.051 ตามลำดับ โดยที่มวลรวม FZ มีค่าการขยายตัวสูงกว่ามวลรวม LZ และ มวลรวม MZ คิดเป็นร้อยละ 17 และ 60 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาระยะยาวนี้จะเห็นได้ว่ามวลรวม MZ มีแนวโน้มเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา โดยมีการขยายตัวสูงกว่าร้อยละ 0.04 ที่อายุ 189 วัน อย่างไรก็ตามต้องมีการยืนยันด้วยการทดสอบอื่นประกอบการพิจารณาด้วย จากความสัมพันธ์ในสมการเชิงเส้น พบว่า FZ มีอัตราการขยายตัว (พิจารณาจากค่าความชันของสมการ) สูงกว่า LZ เท่ากับ 0.0002 (FZ ค่า R Square = 0.985 และ LZ เท่ากับ 0.941) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับ MZ มีค่าความชันของการขยายตัวเท่ากัน (R Square ของ MZ เท่ากับ 0.978)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 45 ผลการทดสอบด้วยวิธีแรงปฏิบัติการขยายตัวของคอนกรีตปรีซึมที่อายุ 140 วัน
หลังถอดแบบ (ก) และ 259 วันหลังถอดแบบ (ข)

ข้อสังเกตประการหนึ่งสำหรับมวลรวม FZ คือมีการขยายตัวมากกว่าร้อยละ 0.04 ตั้งแต่อายุ 90 วัน และปรากฏเห็นการไหลซึมออกของเจล (Exuded Gel) อย่างชัดเจนตั้งแต่อายุ 35 วัน ดังแสดงในภาพที่ 46 ในขณะที่ตัวอย่างคอนกรีต LZ เริ่มพบการไหลซึมออกของเจลที่อายุ 70 วัน และ MZ ที่อายุ 140 วัน



(ก)



(ข)



(ค)

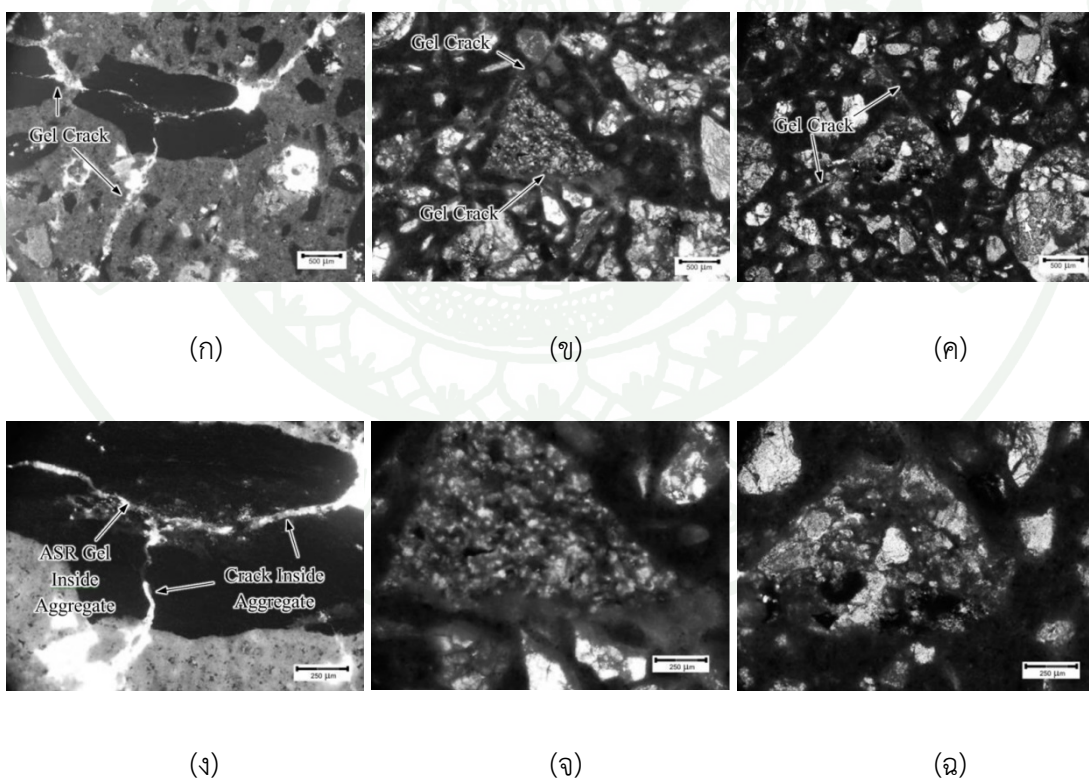
ภาพที่ 46 ตัวอย่างแท่งคอนกรีตปรีซึมที่ทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของคอนกรีตปรีซึมที่อายุ (ก) 35 วัน (ข) 75 วัน และ (ค) 140 วัน
(SZ คือ สัญลักษณ์เดิมของ FZ)

5. การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล

5.1 การวิเคราะห์หน้าตัดแบบบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล

5.1.1 ตัวอย่างแท่งมอร์ตาร์

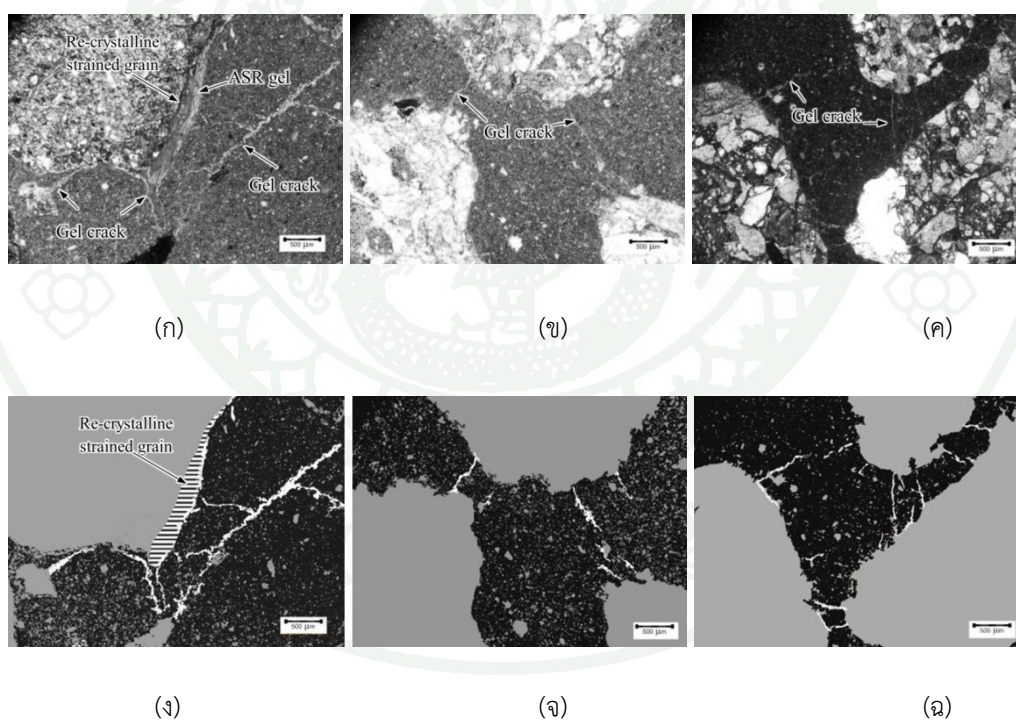
ลักษณะทางกายภาพจากชิ้นตัวอย่างหน้าตัดแบบบางของแท่งมอร์ตาร์ที่เตรียมจากการสับตัดตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผ่านการเร่งปฏิกิริยา เป็นเวลา 108 วัน หลังการถอดแบบ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลใน Plane Polarized Mode แสดงในภาพที่ 47 (ภาพขยายในภาคผนวก ฉ) พบแอลคาไลซิลิกาเจลในรอยแตกร้าว (Gel Crack) ของทุกตัวอย่าง การพบแอลคาไลซิลิกาเจลเป็นอีกหลักฐานหนึ่งที่ยืนยันการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา นอกจากนี้ยังพบว่าในตัวอย่าง FZ มีการแตกร้าวอย่างรุนแรงในเมทริกซ์ที่มีแอลคาไลซิลิกาเจล และพบการแตกร้าวภายในมวลรวม ในขณะที่ไม่พบการแตกร้าวภายใน และลักษณะการแตกร้าวแบบนี้ในตัวอย่าง MZ และ LZ



ภาพที่ 47 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลหน้าตัดแบบบางของตัวอย่างแท่งมอร์ตาร์ ของ (ก) FZ (ข) MZ (ค) LZ ที่กำลังขยาย 40 เท่า และ (ง) FZ (จ) MZ (ฉ) LZ ที่กำลังขยาย 100 เท่า

5.1.2 ตัวอย่างแท่งคอนกรีตไมโครบาร์

ลักษณะของหน้าตัดแบบบางของตัวอย่างแท่งคอนกรีตไมโครบาร์ที่ผ่านการเร่งปฏิกิริยาเป็นเวลา 108 วัน หลังการถอดแบบ เช่นเดียวกันกับแท่งมอร์ตาร์ ดังแสดงในภาพที่ 48 (ภาพขยายในภาคผนวก ฉ) พบรอยแตกกว้างตามผิวของมวลรวม และขยายเข้าไปในเมทริกซ์ ซึ่งทุกตัวอย่างทดสอบมีค่าการขยายตัวสูงกว่าเกณฑ์แนะนำดังได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งเป็นยืนยันเพิ่มเติมถึงการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาในตัวอย่างคอนกรีตนี้ สำหรับตัวอย่าง FZ พบว่ามีการเกิดขึ้นของแอลคาไลซิลิกาเจลใกล้ๆกับบริเวณที่เป็น “Re-crystalline Strained Grain” ที่เกิดขึ้นจาก Tectonic Force ทำให้เกิดการ Recrystallize ของควอตซ์ ในอนุภาคมวลรวม และทำให้พบแอลคาไลซิลิกาเจลเกิดขึ้นบริเวณรอบอนุภาคดังกล่าวและขยายเข้าไปในเมทริกซ์ และเมื่อพิจารณาการเสื่อมสภาพอย่างรุนแรงของ FZ ในการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวก็มีความสอดคล้องกันกับขนาดและการเกิดแอลคาไลซิลิกาเจลที่ FZ มีมากกว่า MZ และ LZ อย่างเห็นได้ชัด



ภาพที่ 48 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล หน้าตัดแบบบางของตัวอย่างแท่งไมโครบาร์ ของ (ก) FZ (ข) MZ (ค) LZ และการวิเคราะห์ด้วยรูปภาพ (ง) FZ (จ) MZ (ฉ) LZ โดยสีเทา คือมวลรวม สีดำคือซีเมนต์เพสต์ และสีขาวคือรอยแตกกว้าง

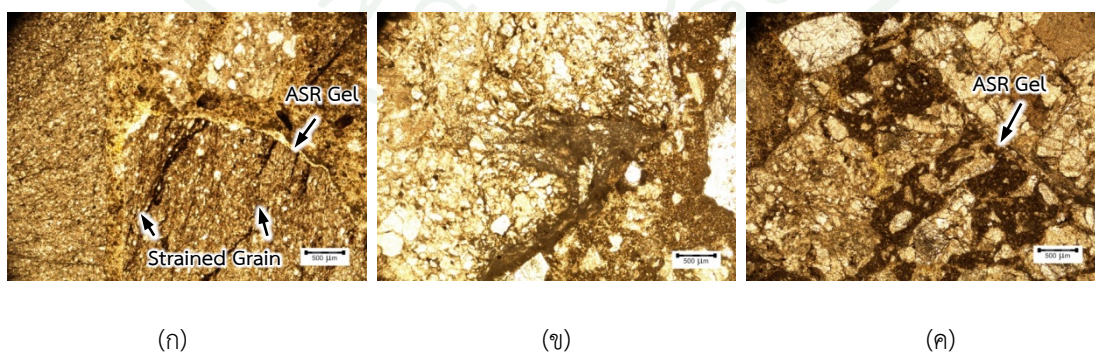
จากการวิเคราะห์โดยประมาณด้วยรูปภาพ (Image Analysis) ดังแสดงในตารางที่ 10 โดยเมื่อพิจารณาจากปริมาณรอยแตกร้าว คือ พื้นที่ ความยาว และความกว้าง พบว่า FZ มีปริมาณการแตกร้าวมากกว่ามวลรวมชนิดอื่นอย่างชัดเจนโดยมี LZ มีปริมาณการแตกร้าวรองลงมาตามด้วย MZ ตามลำดับ

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ด้วยรูปภาพ

ตัวอย่าง	พื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร)		ความยาว (มิลลิเมตร)		ความกว้าง (มิลลิเมตร)
	(ร้อยละ)		สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
FZ	0.389	2.636	3.154	0.542	0.119
MZ	0.083	0.561	0.683	0.232	0.022
LZ	0.090	0.611	0.787	0.155	0.042

5.1.3 ตัวอย่างคอนกรีตปริซึม

การวิเคราะห์หน้าตัดแบบบางของตัวอย่างคอนกรีตปริซึม ที่อายุ 140 วัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล ดังแสดงในภาพที่ 49 (ภาพขยายในภาคผนวก ฉ) พบว่าในกรณี FZ มีแอลคาไลซิลิกาเจลเกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสของมวลรวมที่มี Strained Grain ที่เกิดจาก Fault Tectonic Forced และทำให้เกิดการ Recrystallization เกิดการเรียงตัวใหม่ของ Subgrains, Serrated Boundaries และ Small Grains ที่ก่อตัวขึ้นมาใหม่ (Hasdemir *et al.*, 2012; Šachlová *et al.*, 2011) ทำให้สถานะความเป็นผลึก และการเรียงตัวในอนุภาคของมวลรวมเปลี่ยนไป (Kerrick and Hooton, 1992; Mladenovic *et al.*, 2009) และเป็นสาเหตุให้มวลรวม FZ มีความไวและสามารถทำปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาสูงกว่ามวลรวม MZ และ LZ ที่อยู่ข้างเคียง



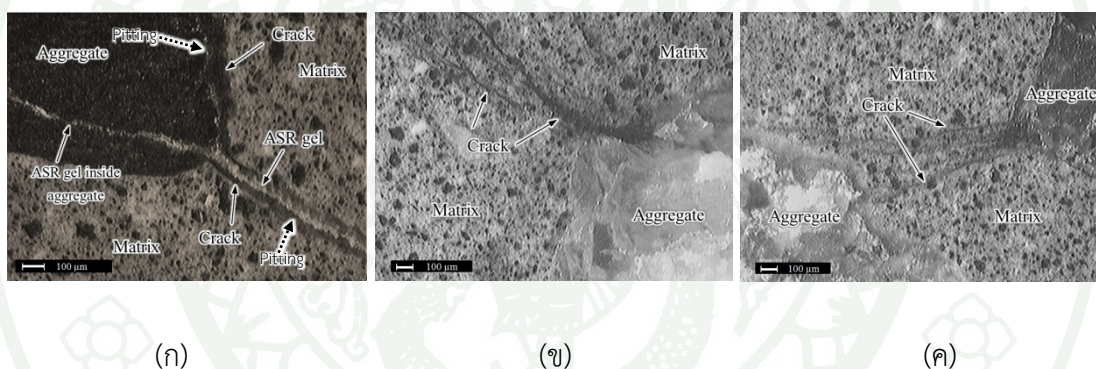
ภาพที่ 49 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลหน้าตัดแบบบางของตัวอย่างคอนกรีตปริซึม

(ก) FZ (ข) MZ และ (ค) LZ

5.2 การวิเคราะห์หน้าตัดเคลือบและขัดด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล

5.2.1 ตัวอย่างแท่งคอนกรีตไมโครบาร์

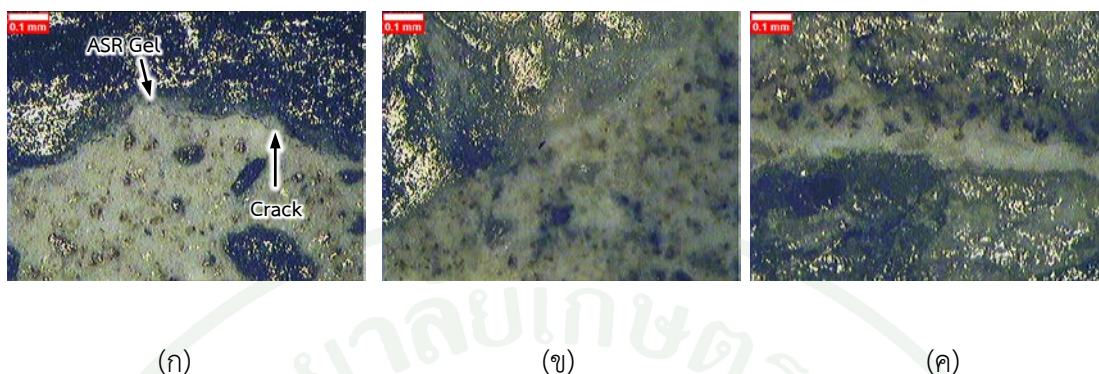
ลักษณะจากการวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลสำหรับตัวอย่างหน้าตัดเคลือบและขัดของคอนกรีตไมโครบาร์ ที่อายุ 108 วัน ดังแสดงในภาพที่ 50 พบว่าในทั้งสามตัวอย่างทดสอบปรากฏเห็นรอยแตกร้าวและแอลคาไลซิลิกาเจลปรากฏอย่างชัดเจน และในกรณี FZ ก็มีลักษณะการแตกร้าวและเกิดแอลคาไลซิลิกาเจลภายในมวลรวมซึ่งต่างจากมวลรวมชนิดอื่นอย่างเห็นได้ชัด และยังพบว่าสามารถมองเห็นแอลคาไลซิลิกาเจล และการแตกหลุด (Pitting) เกิดขึ้นในบริเวณ Interface zone ระหว่างมวลรวม FZ และเมทริกซ์ได้อย่างชัดเจนซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ในกรณีหน้าตัดแบบบาง



ภาพที่ 50 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลของหน้าตัดเคลือบและขัดของตัวอย่างคอนกรีตไมโครบาร์ (ก) FZ (ข) MZ และ (ค) LZ

5.2.2 ตัวอย่างคอนกรีตปรีซีม

การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลสำหรับหน้าตัดเคลือบและขัดของปรีซีม (อายุ 259 วัน) ดังแสดงในภาพที่ 51 พบรอยแตกที่บริเวณ Interface zone ระหว่างมวลรวม FZ และเมทริกซ์ ในตัวอย่าง FZ ในขณะที่ไม่พบในมวลรวมอื่นอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามในตัวอย่างและวิธีทดสอบนี้ไม่สามารถสังเกตเห็นแอลคาไลซิลิกาเจลได้ชัดเจนเมื่อเทียบกับตัวอย่างไมโครบาร์ อาจเป็นเพราะอัตราการเร่งปฏิกิริยาและการขยายตัวของคอนกรีตปรีซีมที่ต่ำกว่าคอนกรีตไมโครบาร์ หรือกำลังขยายที่ใช้อยู่ไม่เพียงพอ อย่างไรก็ตามตัวอย่างชุดนี้จะนำไปศึกษาด้วยวิธีวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคัลต่อไป

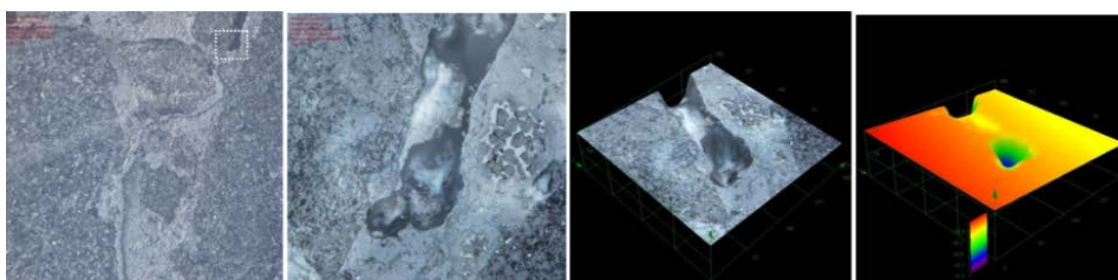


ภาพที่ 51 การวิเคราะห์หน้าตัดเคลือบและขัดด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลตัวอย่างคอนกรีตปริซึม
ที่กำลังขยาย 50 เท่า (ก) FZ (ข) MZ และ (ค) LZ

6. การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปโตดิจิทัล

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพสำหรับตัวอย่างหน้าตัดเคลือบและขัดจากชั้นตัวอย่างคอนกรีตปริซึม ด้วยกล้องออปโตดิจิทัลเป็นวิธีที่มีประโยชน์มากในกรณีที่ต้องการระบุจุดสนใจบนตัวอย่าง ผลการสแกนภาพรวมของตัวอย่างโดยใช้กำลังขยาย 100 เท่าเพื่อทำเป็นแผนที่ และเลือกพื้นที่ที่สนใจเพื่อทำการวิเคราะห์ความลึก และลักษณะทางกายภาพได้อย่างชัดเจนเนื่องจากสามารถถ่ายภาพหลายระดับความลึกแล้วจึงนำมาประมวลผลเป็นภาพที่นำเอาทุกจุดโฟกัสมารวมกันซึ่งวิธีอื่นไม่สามารถทำได้ และแก้ปัญหาเนื่องจากกรณีที่แอลคาไลซิลิกาเจลถูกชะออกขณะเตรียมตัวอย่าง แต่ยังคงมีแอลคาไลซิลิกาเจลค้างอยู่ภายในรอยแตกร้าว ซึ่งกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลไม่สามารถถ่ายภาพในมิติความลึกได้ รูปถ่ายในภาพที่ 52 (ภาพขยายใน ภาคผนวก ข) พบร่องรอยของแอลคาไลซิลิกาเจลได้อย่างชัดเจน สำหรับตัวอย่างคอนกรีตปริซึมของมวลรวม FZ และพบการแตกหลุด (Pitting) เป็นหลุมของเจลที่มีความลึกประมาณ 70 ไมโครเมตร (แสดงการวัดใน ภาพผนวกที่ ข5) ในตำแหน่งที่สุ่มศึกษา ในขณะที่มวลรวม MZ และ LZ ไม่พบแอลคาไลซิลิกาเจลได้ชัดเจน

นอกจากนี้เมื่อเพิ่มกำลังขยายของกล้องจากที่ 250 เท่า เป็น 1,000 เท่า และ 3,000 เท่า (ภาพที่ 53) (ภาพขยายใน ภาคผนวก ข) ทำให้สามารถมองเห็นแอลคาไลซิลิกาเจลได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยมีลักษณะเป็นผลึกเกิดขึ้นที่ Interface zone ระหว่างมวลรวม FZ และเมทริกซ์

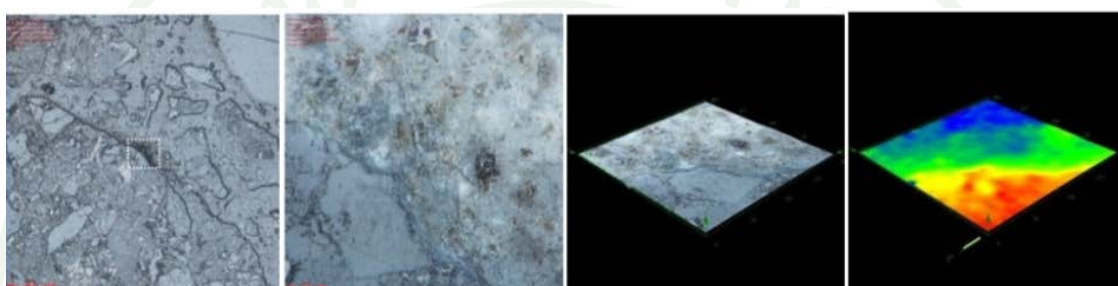


(ก1)

(ก2)

(ก3)

(ก4)

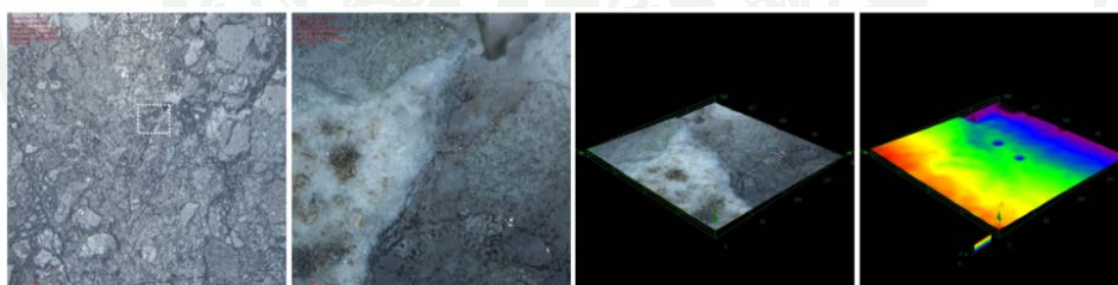


(ข1)

(ข2)

(ข3)

(ข4)



(ค1)

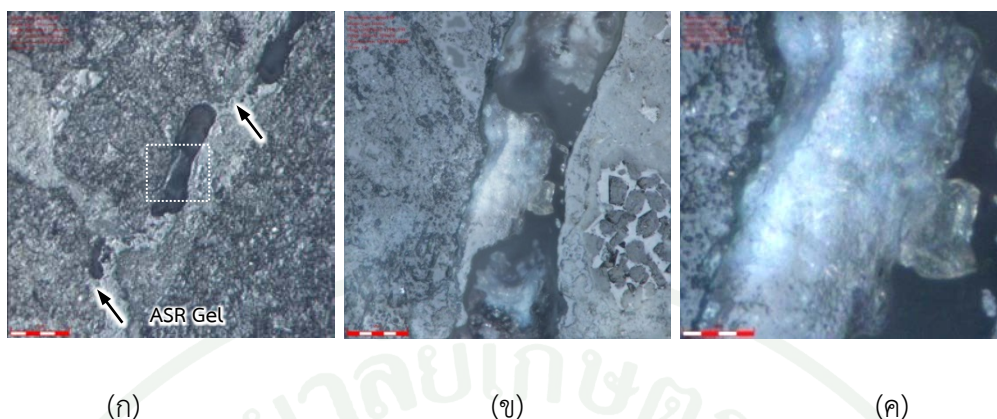
(ค2)

(ค3)

(ค4)

ภาพที่ 52 การวิเคราะห์หน้าตัดเคลือบและขัดตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตปริซึม ด้วยกล้อง
ออปติคัล (ก) FZ (ข) MZ และ (ค) LZ

หมายเหตุ; (x1) แผนที่ของหน้าตัดที่กำลังขยาย 100 เท่า (x2) บริเวณสนใจที่กำลังขยาย 750 เท่า
(x3) ภาพ 3 มิติที่กำลังขยาย 750 เท่า และ (x4) ระดับความลึกของ (x3)

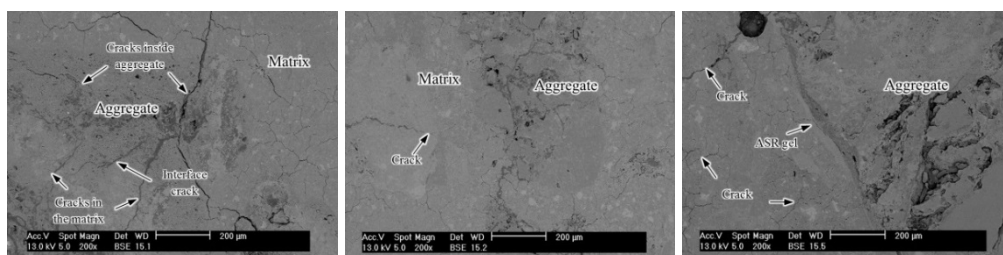


ภาพที่ 53 ภาพขยายบริเวณ ITZ (Interface zone) ซึ่งพบเจลจากชั้นตัวอย่างหน้าตัดเคลือบและขัด จากตัวอย่างคอนกรีตปริซึม FZ ด้วยกล้องออปโตดิจิทัล ที่กำลังขยาย (ก) 250 เท่า (ข) 1,000 เท่า และ (ค) 3,000 เท่า

7. การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตัวอย่างมอร์ตาร์บาร์และคอนกรีตไมโครบาร์ เมื่อผ่านการเคลือบและขัด และเคลือบด้วยอนุภาคทองคำ หลังจากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในภาพที่ 54 จาก Back-Scattered Electrons Image Mode สำหรับตัวอย่างมอร์ตาร์บาร์ และสำหรับตัวอย่างคอนกรีตไมโครบาร์ในภาพที่ 55

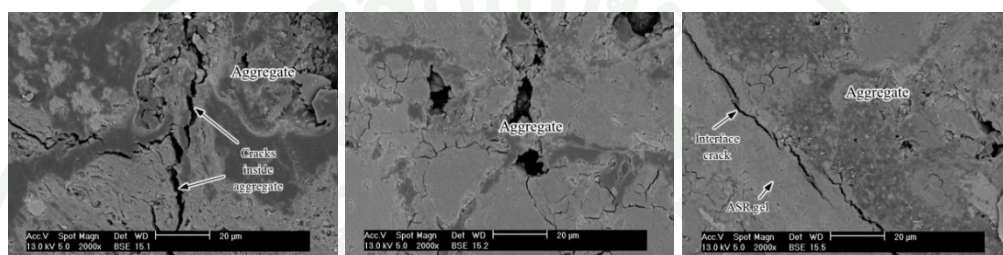
จากภาพพบรอยแตกร้าวเกิดขึ้นภายในเมทริกซ์ชัดเจนในทุกตัวอย่าง โดยตัวอย่าง MZ ทั้งในกรณีมอร์ตาร์บาร์และไมโครบาร์ไม่สามารถพบแอลคาไลซิลิกาเจลได้ชัดเจนมากนัก ในขณะที่ตัวอย่าง LZ พบแอลคาไลซิลิกาเจลได้ชัดเจนกว่า ส่วนตัวอย่าง FZ พบทั้งรอยแตกร้าวปริมาณมากในเมทริกซ์ แอลคาไลซิลิกาเจลบริเวณขอบของมวลรวม รอยแตกร้าวและแอลคาไลซิลิกาเจลภายในมวลรวม ในขณะที่มวลรวมชนิดอื่นไม่พบการแตกร้าวภายในเช่นนี้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการขยายตัว และการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ก่อนหน้า ลักษณะเช่นนี้ยืนยันได้ถึงความรุนแรงของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาที่เกิดขึ้นกับมวลรวม FZ



(ก)

(ข)

(ค)

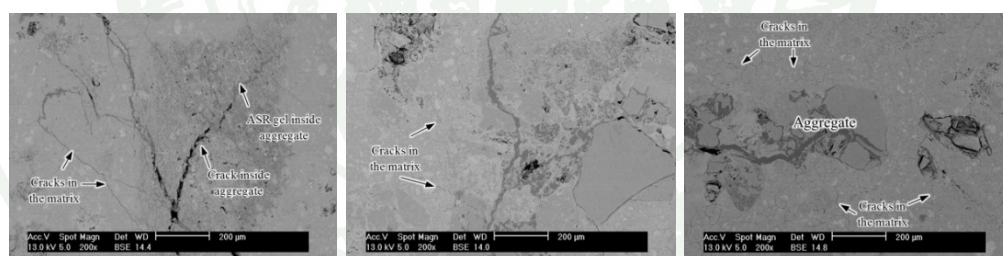


(ง)

(จ)

(ฉ)

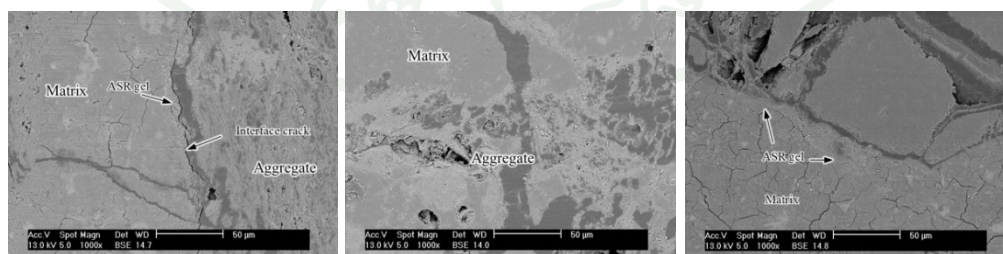
ภาพที่ 54 ตัวอย่างมอร์ตาร์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 100 เท่า (ก) FZ (ข) MZ และ (ค) LZ และ ที่ 2,000 เท่า (ง) FZ (จ) MZ และ (ฉ) LZ



(ก)

(ข)

(ค)



(ง)

(จ)

(ฉ)

ภาพที่ 55 ตัวอย่างคอนกรีตไมโครบาร์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า (ก) FZ (ข) MZ และ (ค) LZ และที่ 2,000 เท่า (ง) FZ (จ) MZ และ (ฉ) LZ

8. การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์

จากการศึกษาอิทธิพลของมวลรวมในเขตรอยเลื่อนที่มีต่อปัญหาแอลคาไลซิลิกาในการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตปรีซึม ที่ผ่านการเคลือบและขัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL JSM-6380LV และชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์ ดังแสดงในภาพที่ 56 ทุกตัวอย่างปรากฏรอยแตกร้าวอยู่ทั่วไป แต่ภายในรอยแตกร้าวไม่พบแอลคาไลซิลิกาเจลที่ชัดเจน คาดว่าเป็นผลจากการเตรียมตัวอย่างที่ใช้น้ำเป็นสารลดความร้อนระหว่างการขัดผิวหน้า ทำให้แอลคาไลซิลิกาเจลชะละลายไปกับน้ำได้ เมื่อใช้ชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์ยิงรังสีเอกซ์ ณ จุดที่คาดว่าเป็แอลคาไลซิลิกาเจล มวลรวม และเมทริกซ์ สำหรับตัวอย่าง FZ 5 จุด ตัวอย่าง MZ และ LZ ตัวอย่างละ 4 จุด (Spot, SP) ซึ่งแสดงภาพขยายของ ภาพที่ 56 (ง) (จ) และ (ฉ) ในภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 11 ซึ่งพบสัญญาณรังสีเอกซ์มีการสะท้อนสูงสุดที่มุมของสารประกอบแอลคาไล (โพแทสเซียม และโซเดียม) เฉพาะที่จุด FZ-SP2 และ FZ-SP3 สำหรับตัวอย่าง FZ ในตัวอย่าง MZ พบที่ MZ-SP1 MZ-SP2 และ MZ-SP3 ส่วนตัวอย่าง LZ ไม่พบการสะท้อนสูงสุดที่มุมของสารประกอบแอลคาไล

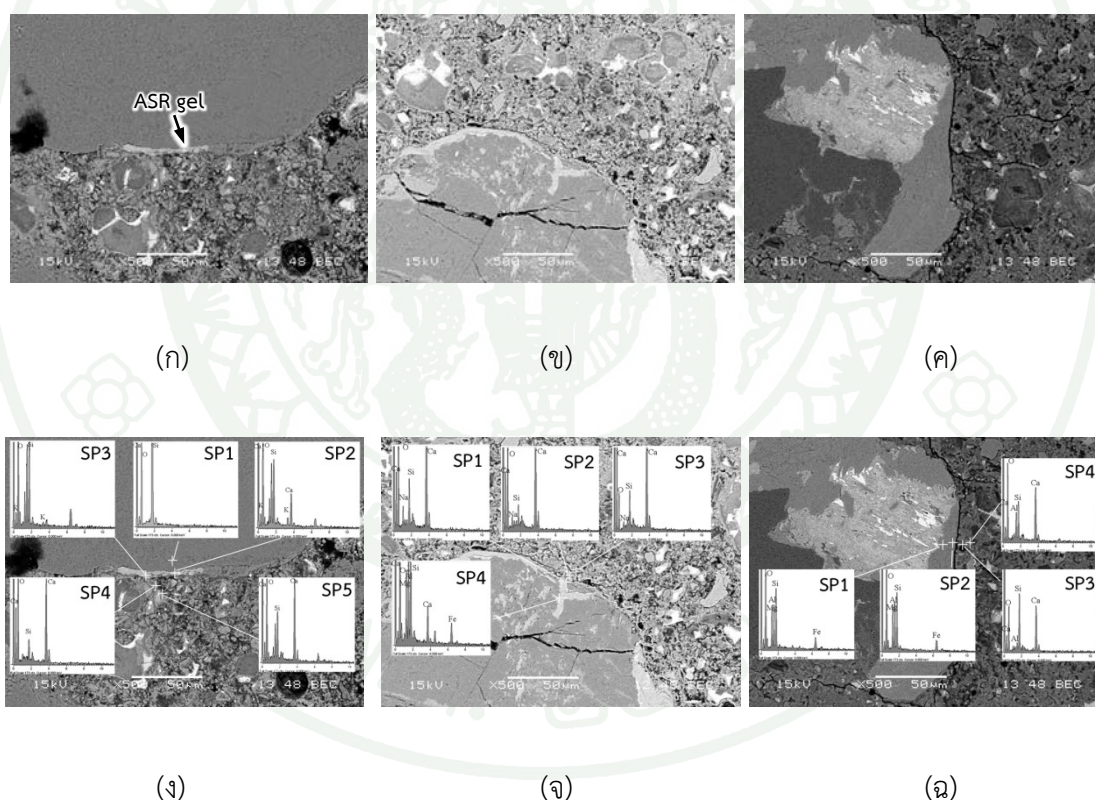
เมื่อพิจารณาจากอัตราส่วนแอลคาไลต่อซิลิกอน และอัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกอน พบว่า FZ-SP2 อัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกอน เท่ากับ 0.67 และอัตราส่วนแอลคาไลต่อซิลิกอนเท่ากับ 0.16 ในขณะที่ FZ-SP3 มีอัตราส่วนแอลคาไลต่อซิลิกอน เท่ากับ 0.05 โดยไม่มีส่วนประกอบของแคลเซียม ส่วนตัวอย่าง MZ พบว่า MZ-SP1, MZ-SP2 และ MZ-SP3 มีอัตราส่วนระหว่างแอลคาไลต่อซิลิกอน เท่ากับ 0.63 0.69 และ 0.25 และอัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกอน เท่ากับ 4.50, 10.18 และ 4.99 ตามลำดับ

จากการศึกษาที่ผ่านมาได้มีการวิเคราะห์องค์ประกอบของแอลคาไลซิลิกาเจล ซึ่งปัจจุบันยังไม่ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนแต่ก็ได้มีข้อมูลจากการเก็บรวบรวมข้อมูลว่าแอลคาไลซิลิกาเจลมีองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนแอลคาไลต่อซิลิกอนและอัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกอน ทั้งสองอย่างร่วมกัน คือมีอัตราส่วนแอลคาไลต่อซิลิกอน อยู่ในระหว่าง 0.10 ถึง 0.30 และอัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกอน ประมาณ 0.25 และอาจมีค่ามากได้หากเป็นเจลที่อยู่ใกล้บริเวณซีเมนต์เพสต์แต่ต้องไม่เกิน 1.3 (Knudsen 1975; Struble, 1979; Diamond, 2000; Thomas, 2001 และ Hou, 2004)

นั่นคือ เมื่อพิจารณาถึงการศึกษาที่ผ่านมาเข้ากับผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 57 พบว่า FZ-SP2 มีอัตราส่วนอัตราส่วนแอลคาไลต่อซิลิกอนเท่ากับ 0.16 และ อัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกอน

เท่ากับ 0.65 อยู่ในช่วงที่ระบุทั้งสององค์ประกอบ ดังนั้น FZ-SP2 คือ แอลคาไลซิลิกาเจล ในขณะที่ FZ-SP3 ไม่มีการสะท้อนสูงสุดที่มุมของสารประกอบแคลเซียม FZ-SP3 จึงไม่ใช่แอลคาไลซิลิกาเจล ส่วน MZ-SP1 และ MZ-SP2 มีอัตราส่วนอัตราส่วนแอลคาไลต่อซิลิกอนและอัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกอนสูงกว่าจะเป็นแอลคาไลซิลิกาเจล และ MZ-SP3 ก็ไม่ใช่แอลคาไลซิลิกาเจลเช่นกัน เพราะถึงแม้ว่ามีอัตราส่วนแอลคาไลต่อซิลิกอนอยู่ในช่วงดังกล่าวแต่มีอัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกอนสูงเกินค่าทั่วไปของเจลที่เคยมีรายงาน

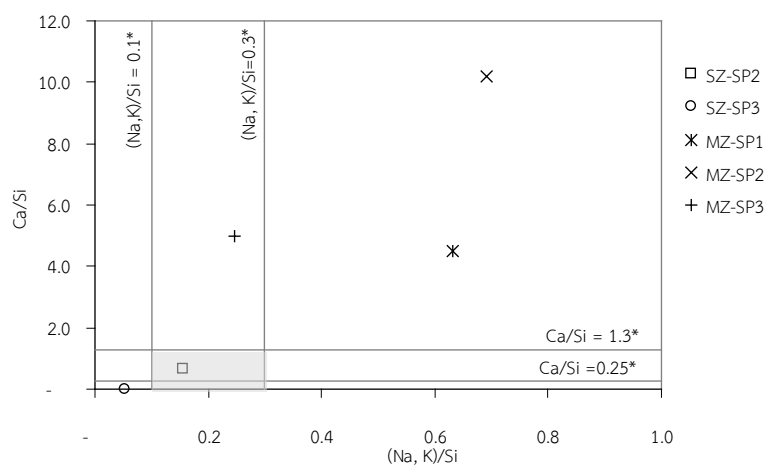
อย่างไรก็ดีการวิเคราะห์ผลการศึกษานี้มีข้อจำกัดเนื่องจากความจำกัดของเครื่องมือและเวลาในการทดสอบประกอบกับผลกระทบจากการเตรียมตัวอย่างซึ่งคาดว่าจะมีผลสำคัญต่อเจลที่อาจถูกชะออกไปจึงเป็นเพียงแนวทางการพิจารณาประกอบผลจากวิธีอื่นเท่านั้น



ภาพที่ 56 การวิเคราะห์โดยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หน้าตัดเคลือบและขีดของตัวอย่าง คอนกรีตปรีซึม (ก) FZ (ข) MZ (ค) LZ และการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์ (ง) FZ (จ) MZ (ฉ) LZ

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์

SP	Atomic (%)			Atomic ratio		การประเมินที่คาด
	Si	Na, K	Ca	(Na, K)/Si	Ca/Si	
FZ-SP1	3.76	-	3.13	-	0.83	Aggregate
FZ-SP2	7.68	1.20	5.17	0.16	0.67	ASR gel
FZ-SP3	10.41	0.54	-	0.05	-	ASR gel
FZ-SP4	1.83	-	12.00	-	6.56	Matrix
FZ-SP5	5.04	-	11.94	-	2.37	Matrix
MZ-SP1	2.82	1.78	12.7	0.63	4.50	Aggregate
MZ-SP2	1.55	1.07	15.78	0.69	10.18	Matrix
MZ-SP3	3.03	0.75	15.12	0.25	4.99	Matrix
MZ-SP4	10.39	-	3.02	-	0.29	Aggregate
LZ-SP1	8.81	-	-	-	-	Aggregate
LZ-SP2	8.18	-	-	-	-	Aggregate
LZ-SP3	8.76	-	10.93	-	1.25	Matrix
LZ-SP4	5.41	-	11.13	-	2.06	Matrix

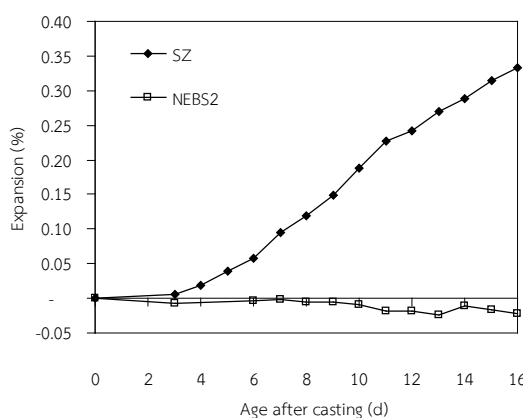


ภาพที่ 57 การวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์ ณ จุดที่รังสีเอกซ์มีการสะท้อนสูงสุดที่มุมของสารประกอบแอลคาไล

หมายเหตุ: * รวบรวมข้อมูลจากงานของ Knudsen, 1975; Struble, 1979; Diamond, 2000; Thomas, 2001 และ Hou, 2004

การศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เพชฌฆาตของมวลรวมเกรย์แวกจากเขตรอยเลื่อน

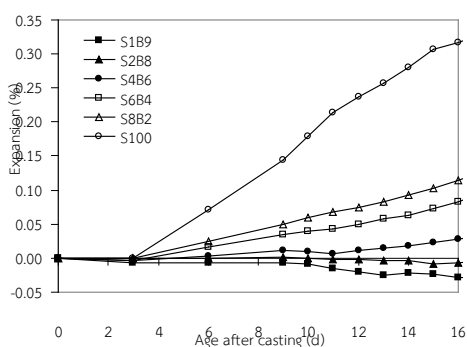
การศึกษาผลกระทบของสัดส่วนระหว่างมวลรวมที่มีความแตกต่างกันในระดับการทำปฏิกิริยาได้ที่มีต่อผลกระทบจากเพชฌฆาต โดยผันแปรอัตราส่วนระหว่างมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้และมวลรวมที่ไม่ทำปฏิกิริยาที่คัดเลือกชนิดจากผลการศึกษาพฤติกรรมของการขยายตัวของมวลรวมจากต่างแหล่งในการวิจัยส่วนแรก (จากข้อมูลการขยายตัวของหินในตารางที่ 7 เป็นเกณฑ์) โดยเลือกใช้มวลรวม FZ เป็นมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ และใช้มวลรวม NEBS2 ซึ่งเป็นหินบะซอลต์เป็นมวลรวมที่ไม่ทำปฏิกิริยา โดยมีค่าเฉลี่ยของการขยายตัวเมื่อทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่อายุ 16 วัน สำหรับ FZ และ NEBS2 เท่ากับ 0.333 และ -0.021 ดังแสดงในภาพที่ 58



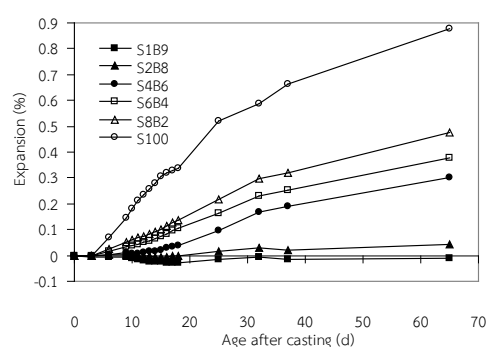
ภาพที่ 58 ค่าเฉลี่ยของการขยายตัวกับเวลาจากการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์มวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ (FZ) และมวลรวมที่ไม่ทำปฏิกิริยา (NEBS2)

นำมวลรวมทั้งสองชนิดผสมด้วยอัตราส่วนระหว่าง มวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ (FZ) และมวลรวมที่ไม่ทำปฏิกิริยา (NEBS2) ในสัดส่วนที่กำหนดโดยให้สัญลักษณ์ดังนี้ S1B9 S2B8 S4B6 S6B4 S8B2 และ S100 ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนระหว่าง FZ ต่อ NEBS2 ที่ร้อยละ 10:90 20:80 40:60 60:40 80:20 และ 100:0 ตามลำดับ ผลการขยายตัวเฉลี่ยของแท่งมอร์ตาร์ทุกสัดส่วนที่อายุ 16 วัน และ 65 วัน ในภาพที่ 59 (และมีรายละเอียดในภาคผนวก ก) แท่งตัวอย่างที่อายุ 16 วันหลังถอดแบบและบ่มเร่ง S1B9 S2B8 S4B6 S6B4 S8B2 และ S100 มีค่าการขยายตัวที่ร้อยละ - 0.028, - 0.007, 0.028, 0.083, 0.115 และ 0.318 ตามลำดับ โดยอัตราส่วนที่มีมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้สูงมีค่าการขยายตัวมาก โดย S100 ที่เป็นมอร์ตาร์ที่ผสมด้วยมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ทั้งหมดมีการขยายตัวสูงสุด และเมื่อพิจารณาอายุทดสอบที่ระยะยาว ถึงเวลา 65 วัน ตัวอย่างทุกสัดส่วนมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยมอร์ตาร์ที่ขยายตัวสูงที่สุดยังคงเป็นมอร์ตาร์ที่ผสมด้วยมวลรวมที่ทำ

ปฏิกิริยาได้ทั้งหมด แสดงว่าเมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้นอัตราการขยายตัวของมอร์ตาร์ก็ยังคงมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มร้อยละของมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้โดยพฤติกรรมตามจริงทุกอายุเริ่มไม่เป็นเส้นตรงเมื่อสัดส่วนของมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยามากกว่าร้อยละ 60 และชัดเจนมากขึ้นเมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์แบบพหุนาม (Polynomial) (ภาพที่ 60) พบว่าที่สัดส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมด้วยมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ทั้งหมดมีความชันของเส้นโค้งมากที่สุด และความชันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมอร์ตาร์มีอายุเพิ่มขึ้น (ที่อายุ 16 วัน 30 วัน และ 65 วัน ความชันของเส้นโค้ง ของ S100 เท่ากับ 0.006, 0.009 และ 0.012 ตามลำดับ) ซึ่งแสดงว่ามอร์ตาร์ที่ผสมด้วยมวลรวมเกรย์แควจากเขตรอยเลื่อนนี้ไม่แสดงแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาลดลงหากเพิ่มสัดส่วนของมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ นั่นคือไม่เกิดปรากฏการณ์เพสซิมัมสำหรับมวลรวมชนิดนี้

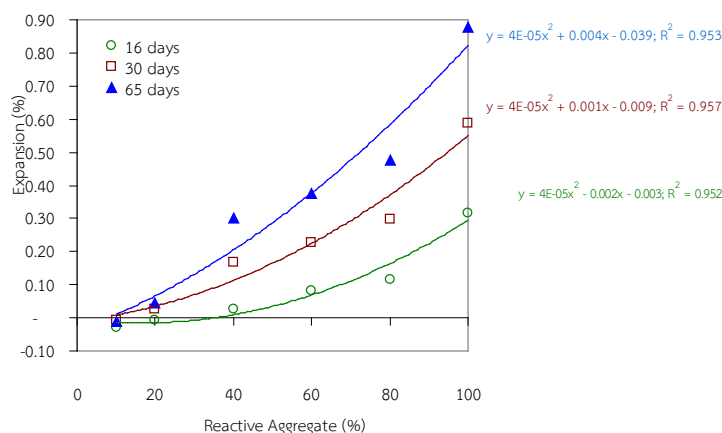


(ก)



(ข)

ภาพที่ 59 การขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ ที่ผันแปรส่วนผสมระหว่างมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ และมวลรวมที่ไม่ทำปฏิกิริยา (ก) ที่อายุ 16 วัน และ (ข) ที่อายุ 65 วัน

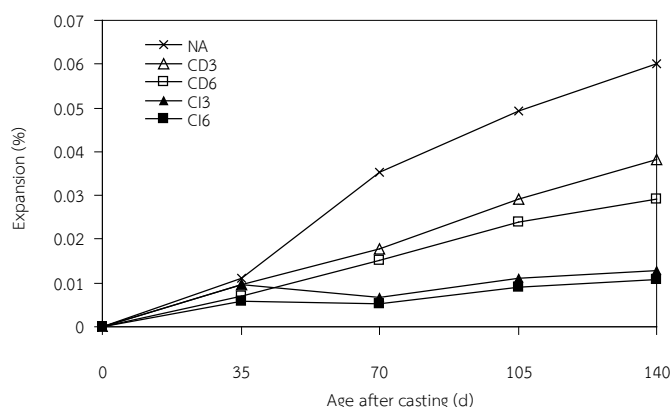


ภาพที่ 60 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของอัตราการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ และร้อยละมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้

การศึกษาผลกระทบจากสภาพแวดล้อมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

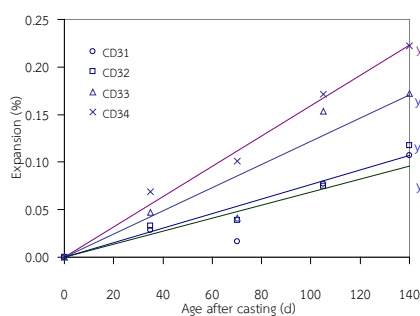
1. การทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของคอนกรีตปรีซึม

การจำลองสภาวะแวดล้อมในการศึกษาผลกระทบของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เพื่อให้มีตัวแปรความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่แตกต่างกัน และใช้วิธีเร่งการขยายตัวของแท่งตัวอย่างคอนกรีตปรีซึมจนมีอายุ 140 วัน หลังการถอดแบบของตัวอย่าง NA, CD3, CD6, CI3 และ CI6 แสดงผลการทดสอบได้ดังภาพที่ 61 (รายละเอียดในตารางผนวกที่ ญ1) จากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างควบคุม NA ที่ไม่มีอิทธิพลจากสภาวะแวดล้อมคลอไรด์มีค่าการขยายตัวสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.060 ในขณะที่ตัวอย่างที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมคลอไรด์หากมีความเข้มข้นสูงกว่า (ร้อยละ 6 สูงกว่าร้อยละ 3) มีแนวโน้มทำให้ค่าการขยายตัวลดลงโดยตัวอย่าง CD3, CD6, CI3 และ CI 6 มีค่าการขยายตัวเท่ากับ 0.038 0.029 0.013 และ 0.011 ตามลำดับ

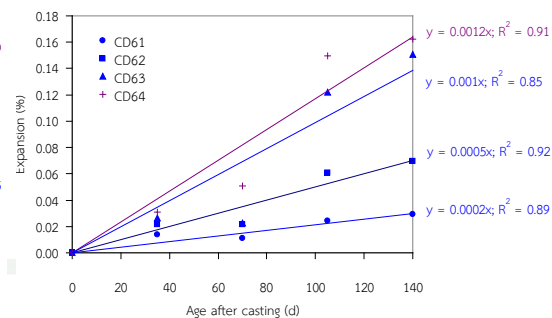


ภาพที่ 61 การขยายตัวของแท่งคอนกรีตปรีซึมที่สภาวะแวดล้อมของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ในการขยายตัวของคอนกรีตปรีซึมเมื่อพิจารณาถึงการแพร่ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่บริเวณ 1 (จมนสารละลาย) บริเวณ 2 (ปริ่มสารละลาย) บริเวณ 3 (ระยะแพร่) และบริเวณ 4 (ระยะแพร่บนสุด) แสดงได้ดังภาพที่ 62 (รายละเอียดในตารางผนวกที่ ญ2) ในกรณีการแพร่ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 หรือ CD 3 (ภาพที่ 62 ก.) พบว่าที่ระยะการแพร่บนสุด (CD34) มีการขยายตัวสูงที่สุดในทุกช่วงอายุ ในขณะที่ ระยะ CD31 (จม) มีค่าการขยายตัวต่ำสุดในทุกช่วงอายุ เช่นเดียวกันกับในกรณีสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 6 (ภาพที่ 62 ข.) ซึ่งสอดคล้องกับกรณี CI3 และ CI6 ที่มีค่าการขยายตัวต่ำสุดเมื่อเทียบกับสภาวะแวดล้อมอื่น



(ก)



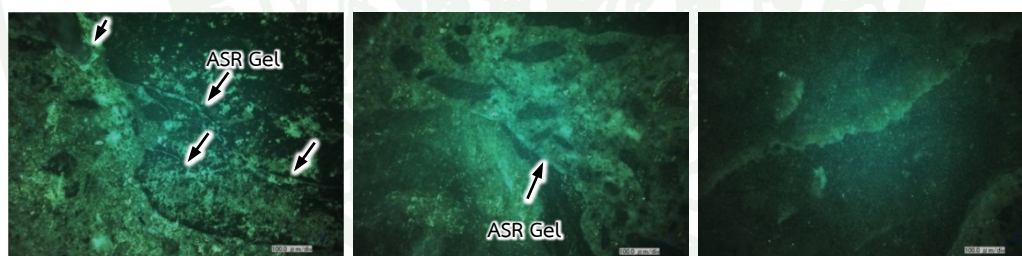
(ข)

ภาพที่ 62 การขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่สภาวะแวดล้อมของสารละลายไซโตไคน์คลอไรด์ต่างกัน

(ก) CD3 ที่บริเวณ 1 ถึง 4 (ข) CD6 ที่บริเวณ 1 ถึง 4

2. การวิเคราะห์ด้วยจุลทรรศน์ดิจิทัล

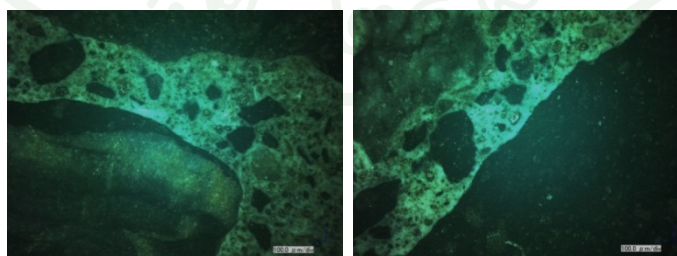
การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลหน้าตัดเคลือบและขัดตัวอย่างของปริซึม (อายุ 140 วัน) ภาพได้สภาวะแวดล้อมคลอไรด์ที่แตกต่างกัน โดยเป็นตัวอย่างที่ตัดมาจากคอนกรีตตำแหน่งเดียวกัน แสดงในภาพที่ 63



(ก)

(ข)

(ค)



(ง)

(จ)

ภาพที่ 63 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล หน้าตัดเคลือบและขัดของตัวอย่าง

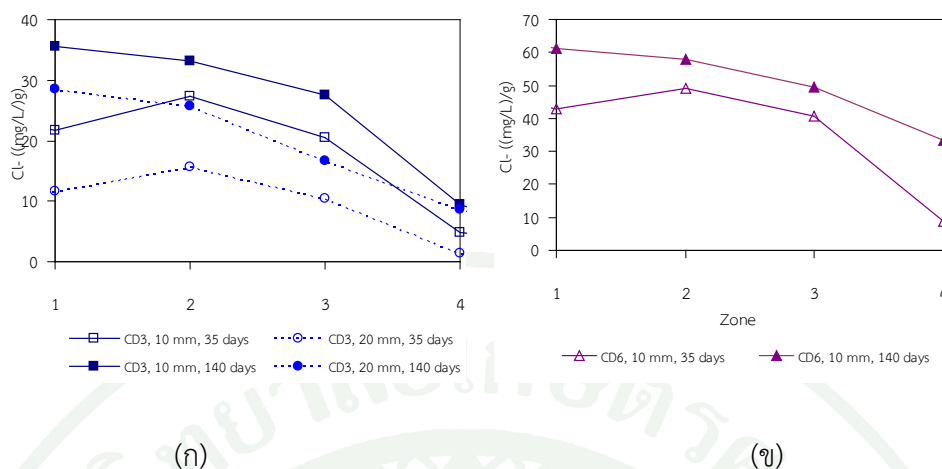
คอนกรีตปริซึม (ก) NA (ข) CD3 (ค) CD6 (ง) CI3 และ (จ) CI6

พบว่าตัวอย่าง NA สังเกตเห็นแอลคาไลซิลิกาเจลที่บริเวณ Interface zone ระหว่างมวลรวมและเมทริกซ์ รอยแยกกว้างภายในมวลรวมและแอลคาไลซิลิกาเจลภายในมวลรวมอย่างชัดเจน ในขณะที่ตัวอย่างที่อยู่ภายใต้สภาวะคลอไรด์มีเพียง ตัวอย่าง CD3 ที่พบแอลคาไลซิลิกาเจลบางส่วนที่ Interface zone ระหว่างมวลรวมและเมทริกซ์ ส่วนตัวอย่างอื่นพบแนวขอบที่สังเกตเห็นความแตกต่างจากเมทริกซ์ทั่วไป ซึ่งต้องวิเคราะห์ต่อไปด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์

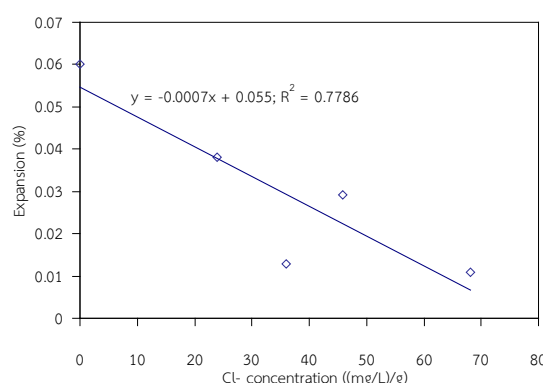
3. การวิเคราะห์ชีวไฟฟ้าไอออน

การวิเคราะห์ชีวไฟฟ้าไอออน (Ion-Selective Electrodes Analysis, ISE) จากการละลายผงคอนกรีตที่เจาะจากแท่งตัวอย่างที่ผ่านการจำลองสภาวะแวดล้อมการแพร่ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ระดับความลึก 10 และ 20 มิลลิเมตร วัดความเข้มข้นของคลอไรด์ ด้วยเครื่อง Metrohm 781 pH/Ion meter ที่อายุ 35 วัน และ 140 วัน ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 64 (รายละเอียดในภาคผนวก ก) พบว่า ที่ความลึก 10 มิลลิเมตรมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่า ความลึก 20 มิลลิเมตร ในทุกเงื่อนไข ที่อายุ 140 วัน มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่า ที่อายุ 35 วัน และบริเวณ 1 (จมนสารละลายโซเดียมคลอไรด์) มีค่าความเข้มข้นของคลอไรด์สูงที่สุด โดยบริเวณ 4 (ระยะแพร่บนสุด) ความเข้มข้นของคลอไรด์ต่ำที่สุด ในทุกตัวอย่างทดสอบ และที่อายุ 140 วัน ตัวอย่าง CD6 บริเวณ 1 (จมนสารละลายโซเดียมคลอไรด์) ที่ความลึก 10 มิลลิเมตร มีค่าความเข้มข้นของคลอไรด์สูงที่สุด เท่ากับ 61.29 mg/L ต่อกรัมของผงคอนกรีต และตัวอย่าง CD3 บริเวณ 4 มีค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ต่ำที่สุด เท่ากับ 1.42 mg/L ต่อกรัมของผงคอนกรีต นั่นคือบริเวณที่อยู่ใกล้สารละลายโซเดียมคลอไรด์มากกว่าจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์มากกว่า และเมื่อตัวอย่างคอนกรีตมีอายุเพิ่มมากขึ้น ความเข้มข้นของคลอไรด์จะเพิ่มขึ้นจากการแพร่

เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากความเข้มข้นของคลอไรด์ต่อการขยายตัวของแท่งคอนกรีต ที่อายุ 140 วัน และความเข้มข้นของคลอไรด์จากคอนกรีตที่ความลึก 10 มิลลิเมตร (CD3 และ CD6 เป็นความเข้มข้นเฉลี่ย) ดังแสดงในภาพที่ 65 พบว่าการขยายตัวของแท่งคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีความเข้มข้นของคลอไรด์ในสภาวะแวดล้อมเพิ่มขึ้น โดยมีความชันจากความสัมพันธ์เชิงเส้นเท่ากับ -0.0007



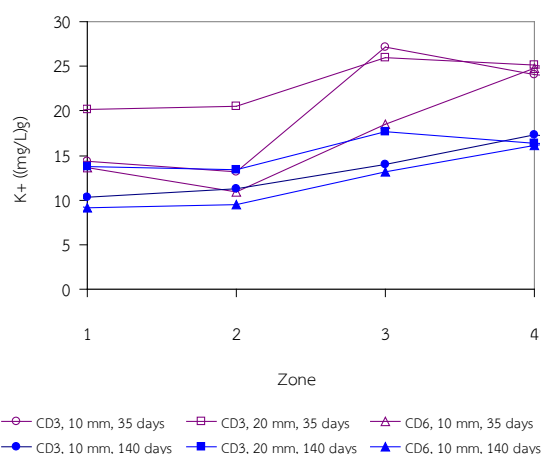
ภาพที่ 64 ความเข้มข้นของคลอไรด์ ภายใต้สภาวะแวดล้อมคลอไรด์ อายุ ความลึก ที่แตกต่างกัน
(ก) CD3 (ข) CD6



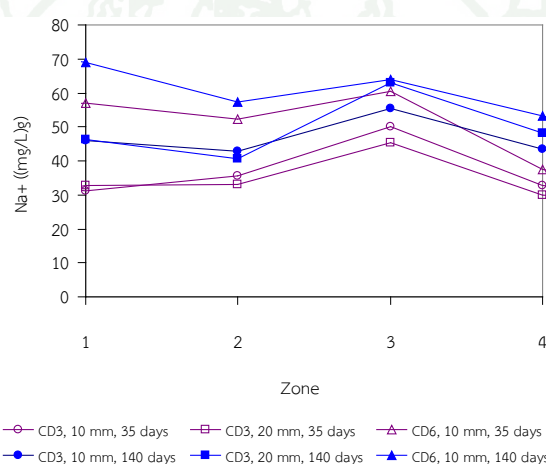
ภาพที่ 65 ผลกระทบจากความเข้มข้นของคลอไรด์ต่อการขยายตัวของคอนกรีตปรีซิม

4. การวิเคราะห์พลาสมาเหนี่ยวนำคู่ควบ

สารละลายจากตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 35 วัน และ 140 วัน จะถูกแบ่งเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกใช้หาความเข้มข้นของคลอไรด์ด้วยวิธีวิเคราะห์ด้วยไฟฟ้าไอออนในข้อ 3 อีกส่วนนำมาผ่านการกรองด้วย Syringe Filter ขนาด 0.45 ไมโครเมตร เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พลาสมาเหนี่ยวนำคู่ควบ (Inductively Coupled Plasma, ICP) ได้ผลการทดสอบความเข้มข้นของโปตัสเซียมไอออน และความเข้มข้นของโซเดียมไอออนแสดง ดังภาพที่ 66 และ ภาพที่ 67 (รายละเอียดในภาคผนวก ก) ตามลำดับ



ภาพที่ 66 ความเข้มข้นของโพตัสเซียมไอออนจากการวิเคราะห์พลาสมาเหนี่ยวนำคู่ควบ

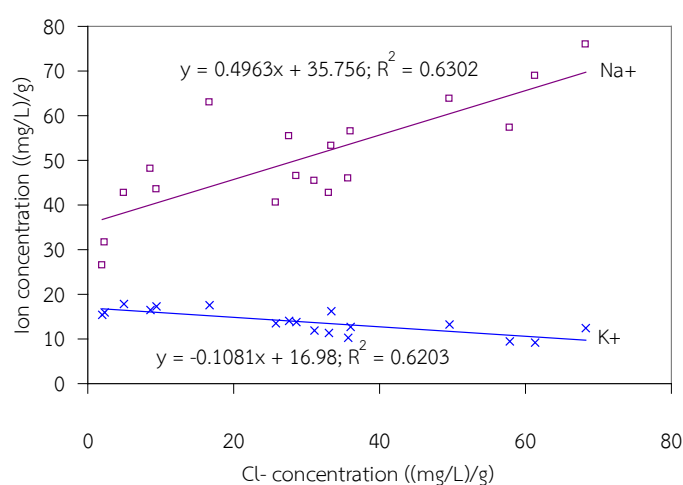


ภาพที่ 67 ความเข้มข้นของโซเดียมไอออนจากการวิเคราะห์พลาสมาเหนี่ยวนำคู่ควบ

ในกรณีการทดสอบความเข้มข้นของโพตัสเซียมไอออน เมื่อเวลาในการแพร่เพิ่มขึ้น พบว่าค่าความเข้มข้นของโพตัสเซียมไอออน มีแนวโน้มลดลง จากเดิมที่อายุ 35 วัน มีค่าความเข้มข้นของโพตัสเซียมไอออนระหว่าง 11-27 mg/L แต่ละบริเวณมีความแตกต่างของค่าความเข้มข้นของโพตัสเซียมไอออนค่อนข้างมาก โดยมีความแตกต่างที่ 8-14.5 mg/L (เมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์เท่ากันและตำแหน่งที่วัดอยู่ในบริเวณเดียวกัน) แต่เมื่อถึงอายุ 140 วัน ค่าความเข้มข้นของโพตัสเซียมไอออนส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 9-17 mg/L ต่อกันของผงคอนกรีตเหลือความแตกต่างกันเพียง 5-8 mg/L โดยเฉพาะในกรณีที่บริเวณนั้นมีเดิมมีค่าความเข้มข้นของโพตัสเซียมไอออนสูง เช่น CD3 ที่ความลึก 20 มิลลิเมตร อายุ 35 วันมีค่าความเข้มข้นของโพตัสเซียมไอออน 18-26 mg/L เมื่อ

อายุที่ 140 วันเหลือเพียง 12-17 mg/L นั่นคือเมื่อระยะเวลาของการแพร่มีมากขึ้นความแตกต่างในความเข้มข้นของโปตัสเซียมอออนมีแนวโน้มลดลง

ส่วนการทดสอบความเข้มข้นของโซเดียมอออน เมื่อเวลาในการแพร่เพิ่มขึ้น พบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของโซเดียมอออนยังไม่ชัดเจนมากนักเมื่อพิจารณาถึงความเข้มข้นของสภาวะแวดล้อมคลอไรด์ ความลึก บริเวณ และอายุของการแพร่ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะนอกจากการเพิ่มปริมาณแอลคาไลออกไซด์ด้วยการเพิ่มความเข้มข้นด้วยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าไปในคอนกรีตแล้วยังมีปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมที่อยู่ในสภาพแวดล้อมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้วยอีกส่วนหนึ่ง ดังแสดงผลกระทบจากความเข้มข้นของคลอไรด์ต่อความเข้มข้นของแอลคาไลอออน ในภาพที่ 68 โดยพบว่าความเข้มข้นของโซเดียมอออนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นของคลอไรด์ในสภาวะแวดล้อมเพิ่มขึ้น โดยมีความชันจากความสัมพันธ์เชิงเส้นเท่ากับ 0.496 ในขณะที่ความเข้มข้นของโปตัสเซียมอออน มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีความเข้มข้นของคลอไรด์ในสภาวะแวดล้อมเพิ่มขึ้น โดยมีความชันจากความสัมพันธ์เชิงเส้นเท่ากับ -0.108

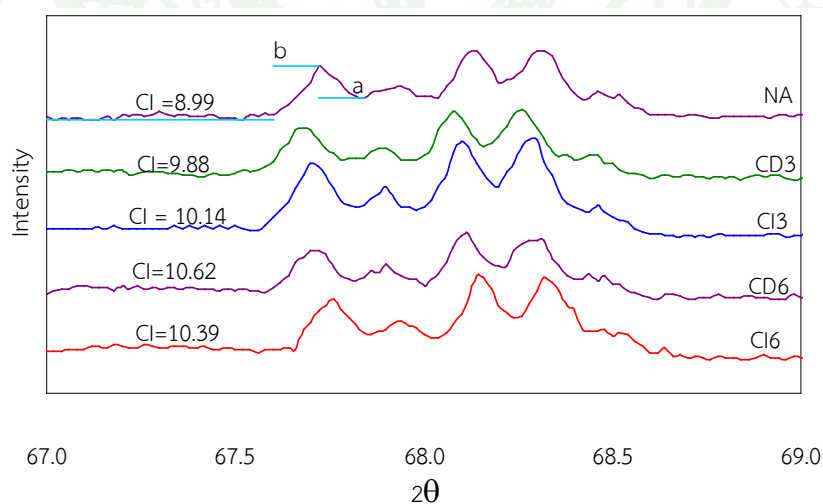


ภาพที่ 68 ผลกระทบจากความเข้มข้นของคลอไรด์ต่อความเข้มข้นของแอลคาไลอออน

5. การวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

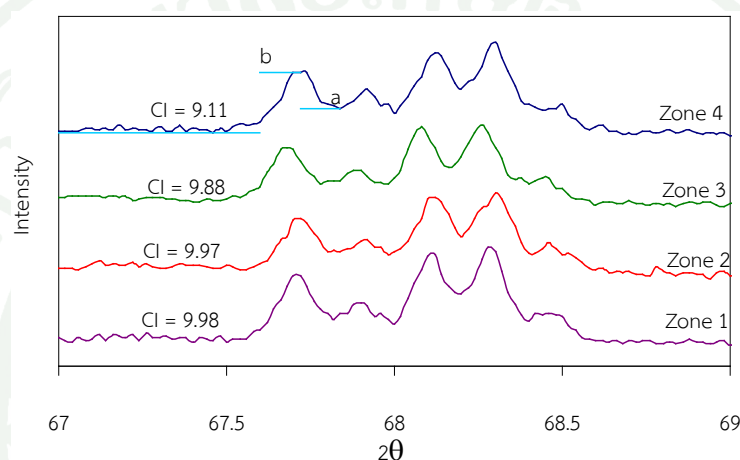
การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สำหรับคอนกรีตปรีซีม โดยมีตำแหน่ง อายุ และการเตรียมตัวอย่าง ในเงื่อนไขเดียวกัน แต่อยู่ในสภาวะแวดล้อมคลอไรด์ต่างกัน เมื่อทำการทดสอบที่ค่าการสะท้อนของรังสีที่มุม 2θ ระหว่าง 67 ถึง 69 องศา ที่การสะท้อนของจุดสูงสุดชุดแรก เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง จุดสูงสุด (a) และต่ำสุดของกราฟ (b) และสามารถคำนวณดัชนีความเป็นผลึก (CI) จากสมการที่ 10 (รายละเอียดในภาคผนวก ก) ได้ดังแสดงในภาพที่ 69

โดยพบว่าตัวอย่าง NA ที่ไม่มีสภาวะแวดล้อมคลอไรด์มีค่า CI ต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 8.99 ในขณะที่ตัวอย่างที่มีสภาวะแวดล้อมคลอไรด์หากมีความเข้มข้นสูงกว่าพบว่ามีแนวโน้มที่ค่า CI จะสูงกว่าคือ ตัวอย่าง CD3 CI3 CD6 และ CI6 มีค่า CI เท่ากับ 9.88 10.14 10.62 และ 10.39 ตามลำดับ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าระดับการทำให้ปฏิกิริยาได้ของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาขึ้นอยู่กับค่าดัชนีความเป็นผลึก วัสดุที่มีผลึกไม่สมบูรณ์จะมีค่าดัชนีความเป็นผลึกต่ำกว่า (Murato and Norman, 1976; Nishiyama *et al.*, 1989; Thomson and Grattan-Bellew, 1993 and Sarkar *et al.*, 2001) นั้นหมายความว่าเมื่อพิจารณาจากค่า CI ในสภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์จะทำให้ค่า CI สูงขึ้น เนื่องจากมวลรวมเกิดความเปลี่ยนแปลงในสถานะของผลึก มีความเป็นผลึกมากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ลดลง และเป็นสาเหตุให้คอนกรีตมีค่าการขยายตัวลดลงเมื่ออยู่ในมีสภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์

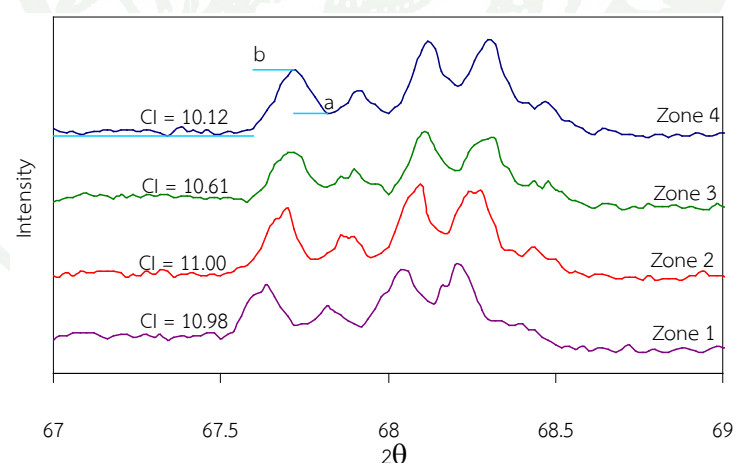


ภาพที่ 69 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ค่าการสะท้อนของรังสีที่มุม 2θ ระหว่าง 67 ถึง 69 องศา และดัชนีความเป็นผลึก (CI) สำหรับคอนกรีตปรีซีม ณ ตำแหน่งเดียวกันแต่อยู่ในสภาวะแวดล้อมคลอไรด์ต่างกัน

ในกรณีตัวอย่างคอนกรีตเดียวกันแต่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ต่างกันจากการแพร่ที่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 และร้อยละ 6 แสดงในภาพที่ 70 โดยพบว่าที่อยู่ระยะแพร่บนสุด (มีความเข้มข้นของคลอไรด์ต่ำที่สุด) มีค่า CI ต่ำที่สุด (CD 3 และ CD6 บริเวณ 4 มีค่า CI = 9.11 และ 10.12 ตามลำดับ) รองลงไปคือ ระยะแพร่ที่บริเวณ 3 (CD 3 และ CD6 บริเวณ 3 มีค่า CI = 9.88 และ 10.61 ตามลำดับ) ส่วนบริเวณ 2 (ปริมสารละลาย) และ บริเวณ 1 (จมนสารละลาย) มีค่า CI ใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับค่าการขยายตัวก่อนหน้านี้



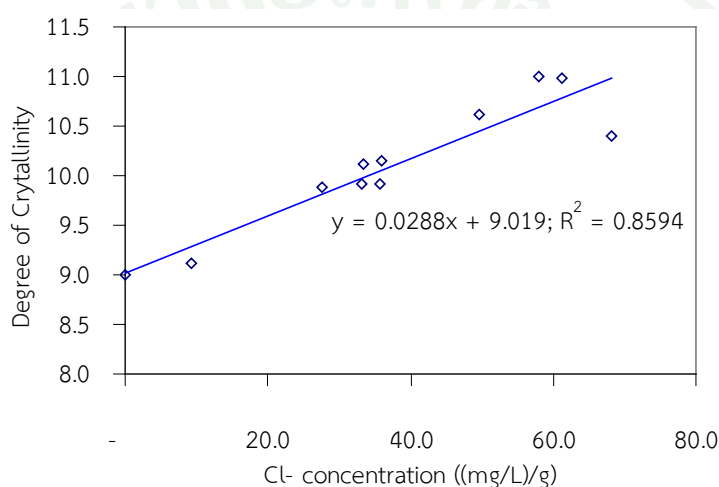
(ก)



(ข)

ภาพที่ 70 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และดัชนีความเป็นผลึก (CI) สำหรับตัวอย่างคอนกรีตเดียวกันแต่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ต่างกันจากการแพร่ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (ก) ความเข้มข้นร้อยละ 3 (ข) ความเข้มข้นร้อยละ 6

เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากความเข้มข้นของคลอไรด์ที่มีต่อดัชนีความเป็นผลึกการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังแสดงในภาพที่ 71 พบว่าดัชนีความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นของคลอไรด์ในสภาวะแวดล้อมเพิ่มขึ้น โดยมีค่าความชันจากความสัมพันธ์เชิงเส้นเท่ากับ 0.0288 เป็นการยืนยันผลการทดสอบก่อนหน้านี้ นั่นคือเมื่อในสภาวะแวดล้อมมีความเข้มข้นของคลอไรด์เพิ่มขึ้นจะทำให้ดัชนีความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และทำให้มวลรวมในคอนกรีตทำปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกาลดลง



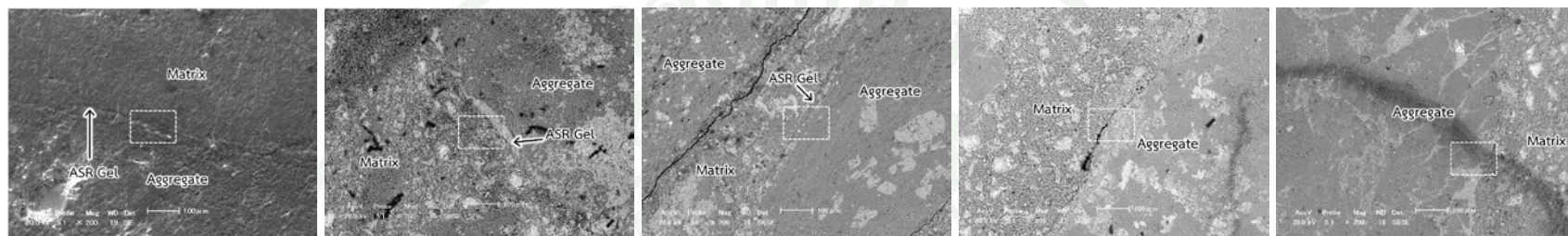
ภาพที่ 71 ผลกระทบจากความเข้มข้นของคลอไรด์ที่มีต่อดัชนีความเป็นผลึก

6. การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์ สำหรับคอนกรีตปรีซิมที่ผ่านการเคลือบและขัด โดยมีตำแหน่ง อายุ และการเตรียมตัวอย่าง ในเงื่อนไขเดียวกัน แต่อยู่ในสภาวะแวดล้อมคลอไรด์ต่างกันมีผลดังแสดงในภาพที่ 72 พบว่าในตัวอย่าง NA CD3 CD6 และ CI3 ปรากฏรอยแตกร้าวอยู่ทั่วไป ส่วนตัวอย่าง CI6 ไม่พบรอยแตกร้าว และพบแนวที่คาดว่าจะเป็นแอลคาไลซิลิกาเจลในตัวอย่าง NA CD3 และ CD6 เพื่อยืนยันถึงแอลคาไลซิลิกาเจลโดยใช้ชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์ยึกรังสีเอกซ์ ณ จุดที่คาดว่าจะเป็นแอลคาไลซิลิกาเจล มวลรวม และเมทริกซ์ ดังแสดงผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 12 และสามารถเขียนให้อยู่ในแผนภาพเฟสไดอะแกรมสามแกน (Triangular Phase Diagram) ดังแสดงในภาพที่ 73 ซึ่งสามารถบอกได้เบื้องต้นว่าจุดที่ทำการยิงประกอบด้วยสารประกอบออกไซด์สองกลุ่ม คือกลุ่มที่มีแคลเซียมออกไซด์ปริมาณมาก (High CaO) และกลุ่มที่มีซิลิกาปริมาณมาก (High SiO₂) โดยทั้งสองกลุ่มมีปริมาณแอลคาไล

ออกไซด์ใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 0.5-5) อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถสรุปด้วยแผนภาพดังกล่าวว่าจุดที่ทำให้การยั้งสีเอกซ์ดังกล่าวเป็นแอลคาไลซิลิกาเจลหรือไม่

เมื่อพิจารณาจากอัตราส่วนแอลคาไลออกไซด์ต่อซิลิกา (ซิลิกอนไดออกไซด์) และอัตราส่วนแคลเซียมและแมกนีเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาจากการศึกษาองค์ประกอบของแอลคาไลซิลิกาเจลที่ผ่านมาพบว่าแอลคาไลซิลิกาเจลมีองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนแอลคาไลออกไซด์ต่อซิลิกาและอัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาทั้งสองอย่างร่วมกัน (เช่นเดียวกับในกรณีวิเคราะห์สารประกอบด้วยธาตุในการทดสอบก่อนหน้านี้) คือมีอัตราส่วนโมล (Mole Ratio) ของแอลคาไลออกไซด์ต่อซิลิการะหว่าง 0.05 ถึง 0.60 และอัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาไม่เกิน 0.2 (Knudsen 1975; Struble, 1979 และ Hou, 2004) เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนนี้และอัตราส่วนดังกล่าวจากตารางที่ 12 สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังภาพที่ 74 และเป็นการยืนยันได้ถึงจุดที่อยู่ในช่วงดังกล่าวที่คาดว่าเป็นแอลคาไลซิลิกาเจลคือ NA-SP1, NA-SP2, CD3-SP1 และ CD6-SP1



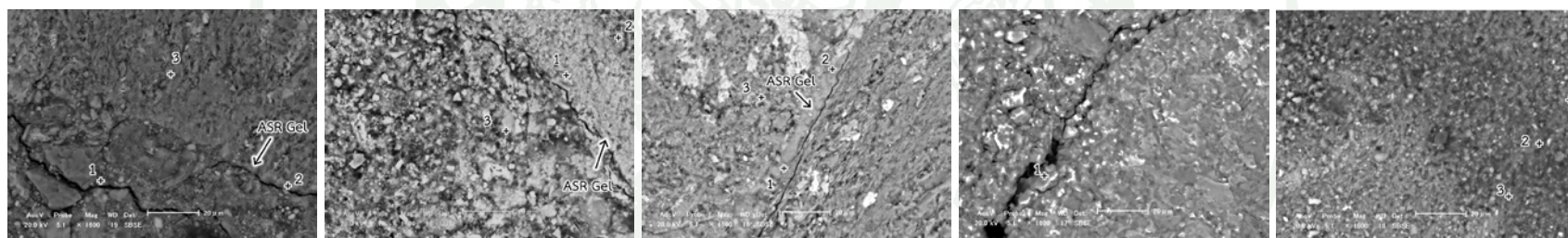
(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

(จ)



(ช)

(ซ)

(ฅ)

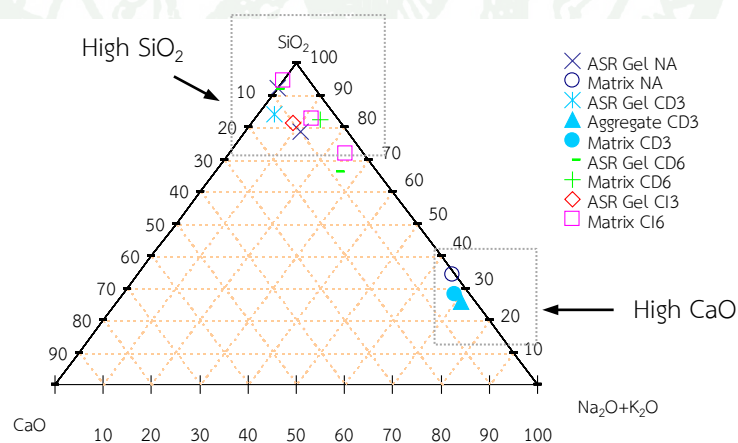
(ญ)

(ฎ)

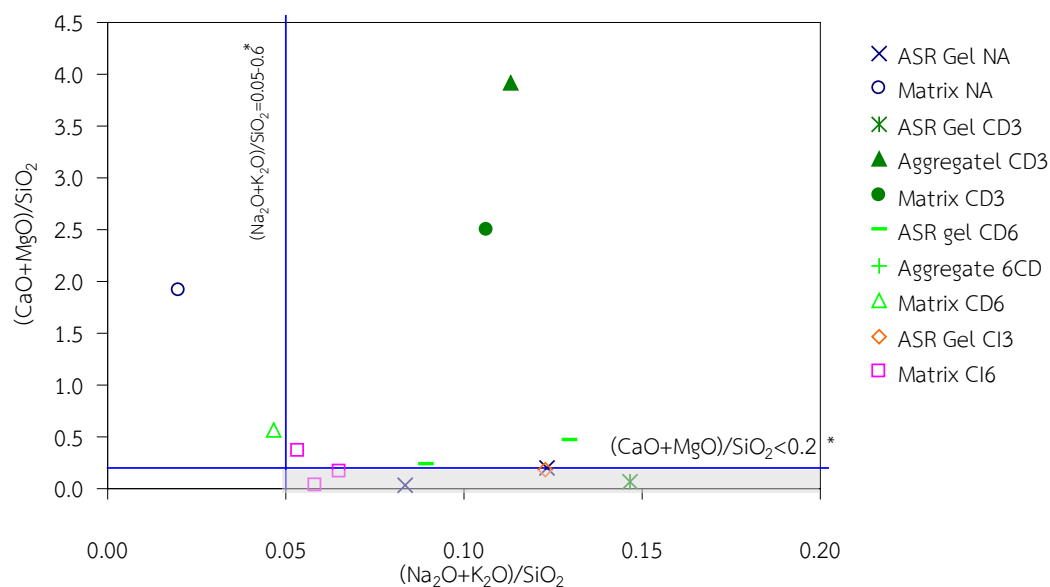
ภาพที่ 72 การวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) NA (ข) CD3 (ค) CD6 (ง) CI3 และ (จ) CI6 และตำแหน่ง ในการยิงรังสีเอกซ์ของชุด
ตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์ (ช) NA (ซ) CD3 (ฅ) CD6 (ญ) CI3 และ (ฎ) CI6

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างในสถานะแวดล้อมคลอไรด์

SP	(Mole ratio, %)				(Na ₂ O+K ₂ O)	(CaO+MgO)	การ
	SiO ₂	CaO	Na ₂ O+K ₂	MgO	/SiO ₂	/SiO ₂	ประเมินที่
			O				คาด
NA-SP1	39.03	5.82	4.814	1.722	0.123	0.193	ASR gel
NA-SP2	49.78	-	4.148	1.288	0.083	0.026	ASR gel
NA-SP3	22.59	43.24	0.450	-	0.020	1.914	Matrix
CD3-SP1	36.64	1.50	5.366	0.986	0.146	0.068	ASR gel
CD3-SP2	8.31	22.89	0.939	9.670	0.113	3.916	Aggregate
CD3-SP3	14.24	34.56	1.516	1.100	0.106	2.504	Matrix
CD6-SP1	9.37	-	0.836	2.247	0.089	0.240	ASR gel
CD6-SP2	17.16	6.54	2.225	1.418	0.130	0.464	ASR gel
CD6-SP3	16.68	2.79	0.779	6.759	0.047	0.573	Matrix
CI3-SP1	14.08	1.47	0.886	1.103	0.063	0.183	ASR gel
CI6-SP1	52.26	-	3.035	1.533	0.058	0.029	Matrix
CI6-SP2	27.99	4.01	3.344	0.868	0.119	0.174	Matrix
CI6-SP3	36.10	12.18	5.615	1.189	0.156	0.370	Matrix



ภาพที่ 73 เฟสไดอะแกรมสามแกนของการวิเคราะห์รังสีเอกซ์



ภาพที่ 74 อัตราส่วนแอลคาไลออกไซด์ต่อซิลิกา และอัตราส่วนแคลเซียมและแมกนีเซียมออกไซด์ต่อซิลิกา

หมายเหตุ: * ข้อมูลจาก Knudsen (1975); Struble (1979); Hou (2004)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาอิทธิพลของมวลรวมในเขตรอยเลื่อนในแหล่งหิน ปรากฏการณ์เพชชิมัม และสถานะแวดล้อมคลอไรด์ที่มีต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา สรุปการศึกษาได้ดังนี้

1. มวลรวมในเขตรอยเลื่อน (FZ) ทำให้ความรุนแรงของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา และการขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมจากบริเวณนอกเขตรอยเลื่อน (MZ และ LZ) และมวลรวมเกรย์แวกทั้งสามชนิดมีแนวโน้มที่จะเกิดปัญหาปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาทั้งสิ้น

2. การวิเคราะห์ด้วยวิธีสัณฐานวิทยา พบว่า องค์ประกอบออกไซด์ของมวลรวมทั้งในและนอกเขตรอยเลื่อน (FZ, MZ และ LZ) มีองค์ประกอบออกไซด์คล้ายคลึงกัน แต่องค์ประกอบทางแร่แตกต่างกัน FZ มี Muscovite สูงกว่ามวล MZ และ LZ โดยมีลักษณะผลึกที่ทำให้ปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า Albite ที่พบมากสำหรับมวลรวม MZ และ LZ มวลรวม FZ มีความแตกต่างทางกายภาพจากมวลรวม MZ และ LZ อย่างเห็นได้ชัดโดยมี Recrystallization Quartz Grains จาก Tectonic Forces อยู่ภายในและมีขนาดเฉลี่ยของ Grain เล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวม MZ และ LZ และจัดอยู่ในประเภท Class III “very likely to be alkali-reactive” ซึ่งมีแนวโน้มเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้มากกว่ามวลรวม MZ และ LZ

3. มวลรวมในเขตรอยเลื่อน (FZ) มีแนวโน้มทำปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิการุนแรงกว่ามวลรวมอื่นในแหล่งเดียวกัน (MZ และ LZ) โดยทำให้การขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ คอนกรีตไมโครบาร์ และคอนกรีตปริซึม สูงกว่า MZ และ LZ ทั้งในระยะสั้น และระยะยาว ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาด้วยวิธีอื่น มีแอลคาไลซิลิกาเจลที่เกิดขึ้นจาก FZ ทำให้พบการแตกร้าวอย่างรุนแรงในเมทริกซ์ และภายในมวลรวม ในขณะที่ตัวอย่างมวลรวม MZ และ LZ ไม่พบลักษณะการแตกร้าวแบบนี้

4. จากการศึกษาไม่พบปรากฏการณ์เพชชิมัมของมวลรวมเกรย์แวกจากเขตรอยเลื่อนโดยเมื่อเพิ่มปริมาณของมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาได้ ทำให้การขยายตัวของมอร์ตาร์เพิ่มตามอย่างต่อเนื่อง

5. ผลกระทบของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นทำให้ปฏิกิริยาอัลคาไลน์ซิลิกาลดลง

6. ในสถานะที่คลอไรด์มีความเข้มข้นสูงขึ้นการขยายตัวจากวิธีเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างคอนกรีตปรีซีมมีค่าลดลง ทั้งค่าการขยายตัวรวม และค่าการขยายตัวในบริเวณที่มีการแพร่ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลที่พบว่าคอนกรีตที่ผสมมวลรวม FZ ที่มีการแตกร้าวดลดลง ซึ่งสรุปได้ว่าคลอไรด์มีผลต่อการลดการขยายตัวและการแตกร้าวด

7. ตัวอย่างที่อยู่ในสถานะแวดล้อมคลอไรด์มีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาเปลี่ยนไป ผลจากการวิเคราะห์ข้อไฟฟ้าอ่อนพบว่าการขยายตัวของแท่งคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีความเข้มข้นของคลอไรด์เพิ่มขึ้น และจากการวิเคราะห์พลาสมาเหนี่ยวนำคู่ควบแสดงความเข้มข้นของโซเดียมอ่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นของคลอไรด์เพิ่มขึ้น แต่ความเข้มข้นของโปตัสเซียมอ่อนมีแนวโน้มลดลง และดัชนีความเป็นผลึกของมวลรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ระดับการทำปฏิกิริยาได้ของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาลดลง และพบแอลคาไลซิลิกาเจลในการศึกษาผลกระทบจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์นี้ด้วย

8. ข้อสรุปคือคลอไรด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกาลดลง เมื่อพิจารณาจาก ความเข้มข้นที่แตกต่างกันด้วยการแพร่ การขยายตัวของคอนกรีตปรีซีม และการวิเคราะห์ด้วยกล้องขยาย โดยมีสาเหตุจากการลดลงของโปตัสเซียมอ่อน และการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกในมวลรวมของคอนกรีต

ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษานี้เป็นการรายงานสิ่งที่ตรวจพบจากจำนวนชิ้นตัวอย่างที่ได้จากการสุ่มสำรวจจึงมีความจำกัดทั้งจำนวน และขอบเขตการทดสอบ ดังนั้นการศึกษาต่อในรายละเอียดที่ครอบคลุมมากขึ้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง

2. การศึกษาอิทธิพลของมวลรวมในเขตรอยเลื่อนในแหล่งหินชนิดอื่นที่มีองค์ประกอบทางองค์ประกอบออกไซด์ และองค์ประกอบทางแร่ ในหลายๆกรณี ควรมีการยืนยันเพิ่มเติม เพื่อให้ครอบคลุมกับชนิด และการกำเนิดของหินแต่ละชนิด อย่างไรก็ตามแหล่งหินอุตสาหกรรมที่มีเขตรอยเลื่อนพาดผ่านแหล่งหินโดยตรงนั้นจำกัด

3. การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาที่ได้รับอิทธิพลจากสภาพแวดล้อม หากสามารถทำได้ในจำนวนตัวแปรและตัวอย่างทดสอบกลุ่มใหญ่ โดยใช้เครื่องมือได้อย่างครอบคลุม จะทำให้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีต่อผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2553. **ฐานข้อมูลภูมิสารสนเทศ
กลางด้านธรณีวิทยา ทรัพยากรธรณี และธรณีพิบัติภัย**. แหล่งที่มา:
<http://www.dmr.go.th/main.php?filename=Gis>, 14 มีนาคม 2553.

กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. 2553. **ฐานข้อมูลทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง**. แหล่งที่มา:
<http://www.dmcr.go.th/marinecenter/coastalzone-lesson18.php>, 23 พฤษภาคม
2555.

กรมอุตุนิยมวิทยาพื้นฐานและการเหมืองแร่. 2553. **ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาพื้นฐานและข้อมูลแร่**.
แหล่งที่มา: <http://www.dpim.go.th/datacenter>, 20 มีนาคม 2553.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2551. **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต**.
สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพมหานคร.

เพ็ญตา สาทรรักษ์. 2552. **ธรณีวิทยาโครงสร้าง**. ภาควิชาเทคโนโลยีธรณี คณะเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2552. **รายงานฉบับ
สมบูรณ์การตรวจสอบความเสียหายและการยืดขยายตัวของฐานราก เสนอต่อการทาง
พิเศษแห่งประเทศไทย**. กรุงเทพมหานคร.

สุวิมล สัจจานิชย์, ปิยะ โชติโกไร, ไรจนากร กันตพงษ์ และ มนสิข สาริกฤติ. 2553.
ความสัมพันธ์ของพฤติกรรมการขยายตัวและปรากฏการณ์ของ ASR. **วารสารวิศวกรรมสาร
ฉบับวิจัยและพัฒนา**. 21 (2). 15-22.

_____, วัชรกร วงศ์คำจันทร์, ฤกษ์ วันอินทร์, มนสิข สาริกฤติ และ ไรจนากร กันตพงษ์.
2553. การใช้เจลเรืองแสงตรวจสอบปรากฏการณ์ ASR ของโครงสร้างเดิม, น. 1-8.
บทความรับเชิญ ใน **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6**. 20-22 ตุลาคม 2553.

Abdul Razak H. and S. Yaakob. 1991. Assessment of potential alkali-silica reactivity of local aggregates, pp.1-2. *In International Conference on Concrete Engineering and Technology*, October 1991. Kuala Lumpur.

American Concrete Institute. 1998. **ACI 221.1r-98 State-of-the-Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity**. 31 p.

American Society for Testing and Materials. 2003. **ASTM C 289-03, Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method)**. Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02. ASTM designation.

_____. 2004. **ASTM C 295-03, Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete**. Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02. ASTM designation

_____. 2004. **ASTM C 856-04; Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete**, Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02. ASTM designation.

_____. 2001. **ASTM C 1260-2001, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)**. Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02: ASTM designation.

Aquino, W., D.A. Lange and J. Olek. 2001. The Influence of Metakaolin and Silica Fume on the Chemistry of Alkali-Silica Reaction Products. **Cement and Concrete Composites** 23 (6): 485-493.

Barber, D.J. 1981. Demountable polished extra-thin sections and their use in transmission electron microscopy. **Mineralogical Magazine** 44:357-359.

Be'rubé', M.A., J. Frenette, A. Pedneault, and M. Rivest. 2002a. Laboratory assessment of the potential rate of ASR expansion of field concrete. **Cement, Concrete and Aggregates** 24(1): 13-19.

- Be'rubé', M.A., J. Frenette, M. Rivest and D. Vezina. 2002b. Measurement of the alkali content of concrete using hot-water extraction. **Cement, Concrete and Aggregates** 24(1): 28-36.
- _____, J.F. Dorion, J. Duchesne, B. Fournier and D. Vezina. 2003. Laboratory and Field Investigations of the Influence of Sodium Chloride on Alkali-Silica Reactivity. **Cement and Concrete Research** 33 (1): 77-84.
- Boddy, A.M., R.D. Hooton and M.D.A. Thomas. 2000. Effect of Product Form of Silica Fume on Its Ability to Control Alkali-Silica Reaction. **Cement and Concrete Research** 30 (7): 1139-1150.
- Callister, Jr. W. D. 1994. **Materials Science and Engineering**. John Wiley & Sons Limited, New York.
- Canadian Standards Association. 2000. **CSA A23.3-94 Design of Concrete Structures**. Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario, Canada.
- Chak, Y.H. and Y.C. Chan. 2005. **GEO Report No. 167: The 2004 Review on Prevention of Alkali Silica Reaction in Concrete**. Geotechnical Engineering Office, Kowloon, Hong Kong.
- Chatterji, S., N. Thaulow and A.D. Jensen. 1987. Studies of ASR: Part 2, **Cement and Concrete Research**, 17; 777-783.
- Chatterjee, A. K. 2001. X-Ray Diffraction, pp. 275-327. In V. S. Ramachandran and J. J. Beaudoin, eds. **Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology**. William Andrew Publishing, Norwich, New York.
- Copuroglu, O. and G. Einarsson. 2011. Montigny viaduct revisited: Microstructure of an ASR damaged concrete from 1959, pp. 200-212. In **Proceedings of the 33th International conference on cement microscopy**. 17-20 April 2011, California, USA.

Crucq, P. 2005. **Development of a Method to Measure the Mechanical Behavior of ASR Gels Part I: Literature Study; Alkali-Silica Reaction, Causes, Effects and Prevention.** Microlab Civil Engineering and Geosciences. November 2005. 55 p.

Diamond, S. 2000. Chemistry and other characteristics of ASR gels, pp. 31–40. *In Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction.* 11–16 June 2000, Quebec, Canada.

Downs R.T. 2006. The RRUFF Project: an integrated study of the chemistry, crystallography, Raman and infrared spectroscopy of minerals, pp. 003-13. *In Proceedings of the 19th General Meeting of the International Mineralogical Association.* 23-26 July 2006, Kobe, Japan.

Federal Highway Administration. 2011. **The History of ASR.** Available Source: <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/ASR/history.cfm>, February 14, 2012.

Ferraris, C.F. 1995. **Alkali-Silica Reaction and High Performance Concrete.** Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg USA, 20 p.

_____, L. R. Clifton, E. L. Garboczi and F.L. Davis. 1997. Stress due to alkali-silica reactions in mortars, pp. 185-192. *In* K.L. Scrivener and J.F. Young, eds. **Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-based Systems.** E & FN Spon, London, United Kingdom.

Fournier, B., R. Chevrier, M. de Grosbois, R. Lisella, K. Folliard, J. Ideker, M. Shehata, M. Thomas and S. Baxter. 2004. The accelerated concrete prism test (60°C): variability of the test method and proposed expansion limits, pp. 314-323. *In Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction,* 15-19 October 2004, Beijing, China.

- Fournier, B., Bérubé, K.J. Folliard and M.D.A. Michael Thomas. 2010. **FHWA-HIF-09-004: Report on the Diagnosis, Prognosis, and Mitigation of Alkali-Silica Reaction (ASR) in Transportation Structures.** The Federal Highway Administration January 2010. 147 p.
- Garcia-Diaz, E., D. Bulteel, Y. Monnin, P. Degrugilliers and P. Fasseu. 2010. ASR Pessimism Behaviour of Siliceous Limestone Aggregates. **Cement and Concrete Research** 40 (4): 546-549.
- Grabe, P.J. and R.E. Oberholster. 2000. Program for the Treatment and Replacement of ASR Affected Concrete Sleepers in the Sishen-Saldanha Railway Line, pp. 1059-1068. *In Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction.* 11–16 June 2000, Quebec, Canada.
- Grattan-Bellew, P.E., G. Cybanski, B. Fournier and L. Mitchell. 2003. Proposed Universal Accelerated Test for Alkali-Aggregate Reaction the Concrete Microbar Test. **Cement, Concrete and Aggregates** 25(2): 29-34.
- Guthrie, G.D. and J.W. Carey. 1998. **Geochemical Methods for the Identification of ASR Gel.** *Journal of the Transportation Research Board* 1668: 68-71.
- Helmuth R., D. Stark, S. Diamond and M. Moranville-Regourd. 1993. **Alkali-Silica Reactivity: An Overview of Research.** Strategic Highway Research Program; 108 p.
- Hasdemir, S., A. Turul and M. Yilmaz. 2012. Evaluation of Alkali Reactivity of Natural Sands. **Construction and Building Materials** 29: 378-385.
- Ideker, J.H., B.L. East, K.J. Folliard, M.D.A. Thomas and B. Fournier. 2010. The Current State of the Accelerated Concrete Prism Test, **Cement and Concrete Research** 40(4): 550-555.

International Programme on Chemical Safety. 1997. **Silane**. ICSC: 0564 International Chemical Safety Card. The International Programme on Chemical Safety & the Commission of the European Communities, 4 July 1997.

Jana, D. 2008. DEF and ASR in Concrete –A Systematic Approach from Petrography, pp. 1-17. *In* **Proceedings of the 13th Conference on Cement Microscopy**, 20-24 April 2008, Reno, Nevada, USA.

John, D.A.S. 1992. Alkali-Aggregate Reaction—New Zealand Experience, pp. 265-285. *In* R. N. Swamy, eds. **The Alkali-Silica Reaction in Concrete**, Blackie and Son Ltd, New York. USA.

Jones, P. 1995. **A38 Marsh Mills Viaduct - BBC Documentary**. Available Source: <http://www.youtube.com/watch?v=OtD4CLXr-7E>, December 20, 2012.

Jun, S.S. and C.S. Jin. 2009. ASR Products on the Content of Reactive Aggregate. **KSCE Journal of Civil Engineering** 14 (4): 539-545.

Katayama, T. 2010. The So-Called Alkali-Carbonate Reaction (ACR) - Its Mineralogical and Geochemical Details, with Special Reference to ASR. **Cement and Concrete Research** 40 (4): 643-675.

_____, M. Tagami, Y. Sarai, S. Izumi and T. Hira. 2004. Alkali-Aggregate Reaction under the Influence of Deicing Salts in the Hokuriku District, Japan. **Materials Characterization** 53 (2-4): 105-122.

Kawamura, M. and K. Takeuchi. 1996. Alkali-silica and pore solution composition in mortars in sea water, **Cement and Concrete Research** 26; 1809– 1819.

_____, and M. Igarashi. 1990. Characteristics of ASR in presence of sodium and calcium chloride, **Cement and Concrete Research** 20: 757–766.

- Kawamura, M., K. Takemoto and M. Ichise. 1989. Influences of the alkali –silica reaction on the corrosion of steel reinforcement in concrete, pp. 115–120. *In Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*. 17-20 July 1989, Society of Materials Sciences, Kyoto, Japan.
- _____, K. Takeuchi, and A. Sugiyama. 1994. Mechanisms of expansion of mortars containing reactive aggregates in NaCl solution, **Cement and Concrete Research** 24: 621–632.
- _____, and K. Iwa. 2004. ASR Gel Composition and Expansive Pressure in Mortars under Restraint. **Cement and Concrete Composites** 26(1): 47-56.
- _____, and T. Kodera. 2005. Effects of Externally Supplied Lithium on the Suppression of ASR Expansion in Mortars. **Cement and Concrete Research** 35(3): 494-498.
- Kerrick, D.M. and R.D. Hooton. 1992. ASR of concrete aggregate quarried from a fault zone: Results and petrographic interpretation of accelerated mortar bar tests. **Cement and Concrete Research** 22(5): 949-960.
- Knudsen, T. and N. Thaulow. 1975. Quantitative microanalyses of alkali– silica gel in concrete, **Cement and Concrete Research** 5: 443– 454.
- Kurtis, K.E., P.J.M. Monteiro, J.T. Brown and W. Meyer-Ilse. 1998. Imaging of ASR Gel by Soft X-Ray Microscopy. **Cement and Concrete Research** 28(3): 411-421.
- Lopez-Buendia, A.M., V. Climent and P. Verd. 2006. Lithological Influence of Aggregate in the Alkali-Carbonate Reaction. **Cement and Concrete Research** 36(8): 1490-1500.

- Lu, D., Z. Xu and M. Tang. 2002. ASR model for aggregate with different microstructure and texture. **Journal of the Chinese Silicate Society** 30(2): 149–54.
- Moreland, G.G. 1968. Preparation of Polished Thin Sections, **American Mineralogist**. 53(5-6): 2070-2074.
- Morris, M. C., H.F. Mc Murdie, E.H. Evans, B. Paretzkin, H.S. Parker, N.P. Pyrrros, and C.R. Hubbard. 1982. **Standard X-Ray Diffraction Powder Patterns**. NBS Monograph. Washington, DC.
- Mullick, A. K. 1992. Alkali-Silica Reaction—Indian Experience, pp. 323-348. *In* R. N. Swamy, eds. **The Alkali-Silica Reaction in Concrete**, Blackie and Son Ltd, New York. USA.
- Murato K.J. and M.B. Norman. 1976. An index of crystallinity for quartz. **American journal of science** 276: 1120-1130.
- Nishibayashi, S., K. Okada, M. Kawamura, K. Kobayashi, T. Kojima, T. Miyagawa, K. Nakano and K. Ono. 1992. Alkali-Silica Reaction-Japanese Experience, pp. 286-322. *In* R. N. Swamy, eds. **The Alkali-Silica Reaction in Concrete**, Blackie and Son Ltd, New York. USA.
- Nishiyama, T., H. Kusuda and K. Nakano. 1989. A few remarks on alkali-reactive chert aggregates, pp. 543-548. *In* **Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction**. 17-20 July 1989, Society of Materials Sciences, Kyoto, Japan.
- Nixon, P.J., C.L. Page, I. Canham and R. Bollinghaus. 1988. Influence of sodium chloride on the ASR, **Advances in Cement Research** 1; 99– 105.

Oakland Macomb Interceptor Drain. 2012. **Pedestrian upgrades Red Run Ryan**

Bridge. Available Source: <http://redrundrain.wordpress.com/>, March 18, 2012.

Poole, A.B. 1992. Introduction to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 17-45. *In* R. N. Swamy, eds. **The Alkali-Silica Reaction in Concrete**, Blackie and Son Ltd, New York, USA.

Prichard, E. 1996. Inorganic analysis: Determination, pp. 95-152. *In* E. Prichard, J. Points and G. M. Mackay, eds. **Trace analysis: A structured approach to obtaining reliable results**. Crown copyright for the Laboratory of the Government Chemist by the Royal Society of Chemistry, Cambridge, United Kingdom.

Razak, A. H. and S. Yaakob. 1991. Assessment of potential alkali-silica reactivity of local aggregates, pp.1-2. *In* **Proceedings of the International Conference on Concrete Engineering and Technology**, October 1991, Kuala Lumpur, Malasia.

RILEM TC 106-AAR. 2000. Alkali-aggregate reaction, A – TC 106-2; Recommended Test Method AAR-2 – detection of potential alkali reactivity of aggregates – the ultra-accelerated mortar-bar test, **Materials and Structures**, 33: 283–289.

Rivard, P., M. Bérubé, J. Ollivier and G. Ballivy. 2007. Decrease of pore solution alkalinity in concrete tested for alkali-silica reaction. **Materials and Structures** 40(9): 909-921.

Rivard, P., B. Fournier and G. Ballivy. 2002. The damaging rating index method for ASR affected concrete - a critical review of the petrographic features of deterioration and evaluation. **Cement, Concrete and Aggregates**; 24(2):1–11.

- Rotter, H. M. 1995. **Report No. EPM/GSC 1995-11: Alkali-Aggregate Reaction from Basic Principles to Structural Behaviour – A literature Review.** École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada. 166p.
- Saccani, A., V. Bonora and P. Monari. 2001. Laboratory Short-Term Evaluation of ASR: A Contribution. **Cement and Concrete Research** 31(5): 739-742.
- Šachlová, Š, Burdová A, Pertold P, Prikryl R. 2011. Macro- and micro-indicators of ASR in concrete pavement. **Magazine of Concrete Research** 63(8): 553–71.
- Sarkar, S. L., X. Aimin and D. Jana. 2001. Scanning Electron Microscopy, X-Ray Microanalysis of Concretes, pp. 231-274. *In* Ramachandran V. S. and J. J. Beaudoin, eds. **Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology.** William Andrew Publishing, Norwich, New York.
- _____, D. G. Zollinger, A.K. Mukhopadhyay, L. Seungwook and C.S. Shon. 2004. **Handbook for Identification of Alkali-Silica Reactivity in Airfield Pavement.** Texas Transportation Institute, Texas.
- Shayan, A. 1998. Effects of NaOH and NaCl solutions and temperature on the behavior of specimens subjected to accelerated AAR tests. **Cement and Concrete Research** 28(1): 25-31.
- _____, A. Xu, G. Chirgwin and H. Morris. 2010. Effects of Seawater on AAR Expansion of Concrete. **Cement and Concrete Research** 40 (4): 563-568.
- Sibbick, R.G. 1993. **The susceptibility of various UK aggregates to alkali-silica reaction,** Ph.D. Thesis, Aston University, Birmingham, United Kingdom.

Sibbick, R.G. and C.L. Page. 1996. Effects of sodium chloride on the alkali-silica reaction in hardened concretes, pp. 822-829 *In Proceedings of the 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*. 19-23 August 1996, Melbourne, Australia.

Sims, I. and A. Poo. 2003. **Advanced Concrete Technology; Concrete Properties**. Elsevier Ltd, Oxford.

_____, and P. Nixon. 2003. RILEM recommended test method AAR-1: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates - Petrographic method. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions** 36(261):480-496.

_____, and P. Sotiropoulos, 1989. A pop-out forming type of ASR in the United Kingdom. *In Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*. 17-20 July 1989, Society of Materials Sciences, Kyoto, Japan.

Stanton, T.E. 1940. Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate, pp. 1781-1811. *In Proceedings of the ASCE*, December 1940, v. 66(10), American Concrete Institute.

Struble, L.J. Swell and S. Diamond. 1979. Properties of synthetic alkali silica gels, Purdue University, Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Beton (CRIB, Laval and Sherbrooke Universities), Quebec, Canada, p. 150.

Sujjavanich, S., P. Suwanvitaya and D. Rothstein. 2011. Investigation of ASR in Mass Concrete Structure: A Case Study, *In the 6th International Structural Engineering and Construction Conference*. 21-26 June 2011, Zürich, Switzerland.

- Sujjavanich, S., W.I. Krit, W. Wongkamjan and P. Dararutana. 2012. The Application of Fluoresced Gel for the First Alkali Silica Reaction Evidence in Thailand, **Advanced Materials Research** 368-373: 613-616.
- Swamy, R.N. 1992. Testing for Alkali-Silica Reaction, pp. 70-111. *In* R. N. Swamy, eds. **The Alkali-Silica Reaction in Concrete**, Blackie and Son Ltd, New York.
- Swenson, E.G. 1957. A Canadian Reactive Aggregate Undetected by ASTM Tests, **ASTM Bulletin** 226: 48—51.
- Tang, M.S., M. Deng, Z. Xu, X. Lan and S.F. Han. 1996. Alkali-Aggregate Reactions in China, pp. 195-201. *In* **Proceedings of the 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction**. 19-23 August 1996, Melbourne, Australia.
- Thomas, M.D.A. 2001. The role of calcium hydroxide in alkali recycling in concrete, Calcium Hydroxide in Concrete, **Materials Science of Concrete** (special issue): 225– 236.
- _____, and K. Follard. 2007. Concrete aggregates and the durability of concrete, pp. 247-281. *In* C. L. Page and M. M. Page eds. **Durability of Concrete and Cement Composites**. Woodhead Publishing and Maney Publishing, Cambridg.
- _____, B. Fournier, K. Folliard, J. Ideker and M. Shehata. 2007. **Research Report ICAR 302-1; Test Methods for Evaluating Preventative Measures for Controllable Expansion Due to ASR in Concrete**. 2006. 62 p.
- Thomson, M.L., P.E. Grattan-Bellew and J.C. White. 1994. Application of Microscopic and XRD Techniques to Investigate Alkali-Silica Reactivity Potential of Rocks and Minerals, pp. 174–192. *In* **Proceedings of the 16th International Conference on Cement Microscopy**. 11 – 14 April 1994, Virginia, USA.

- Touma, W.E. 2000. **Alkali-silica reaction in Portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives**. Ph.D. Dissertation. The University of Texas at Austin.
- _____, Fowler, D.F. and Carrasquillo, R.L. 2001. **Report ICAR 301-1F: Alkali-silica reaction in portland cement concrete: Testing methods and mitigation alternatives**. International Center for Aggregates Research, Austin, Texas, 520 p.
- Vicrods. 2008. **Vicrods Technical Note TN-030: Alkali Silica Reaction in Concrete**. May 2008. 3p.
- Vogel, W. 1994. **Glass Chemistry**. Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg.
- Williams, D.A. and C.B. Carter. 1996. Transmission electron microscopy. Springer, New York.
- Worning, I. and V. Johansen. 1983. Alkalis in cement and concrete manufacture, pp. 221-225. *In Proceedings of the 6th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*. 22-25 June 1983, Copenhagen, Denmark.
- Xiang-yin, M., X. Zhong-zi, W. Ke-ru and T. Ming-shu. 2003. Alkali- Silica Reaction Inhibited by Lioh and Its Mechanism. **Journal of Wuhan University of Technology-Material Sciences** 18(1): 13-16
- Zhongzi, X., L. Xianghui, D. Min and T. Mingshu. 2002. A New Accelerated Method for Determining the Potential Alkali-Carbonate Reactivity. **Cement and Concrete Research** 32(6): 851-857.





ภาคผนวก ก
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพผนวกที่ ก1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ Rigaku - MultiFlex



ภาพผนวกที่ ก2 Oxford/Horiba รุ่น XGT-2000W X-ray Analytical Microscope



ภาพผนวกที่ ก3 อุปกรณ์การทดสอบด้วยวิธีแรงปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์



ภาพผนวกที่ ก4 แบบหล่อคอนกรีตไมโครบาร์ และเครื่องเปรียบเทียบความยาว



ภาพผนวกที่ ก5 ตู้เร่งปฏิกิริยาควบคุมอุณหภูมิและความชื้น



ภาพผนวกที่ ก6 กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล สำหรับศัลยารรณา (BX-41; Olympus)



ภาพผนวกที่ ก7 กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล Nikon รุ่น Micropot-FXA



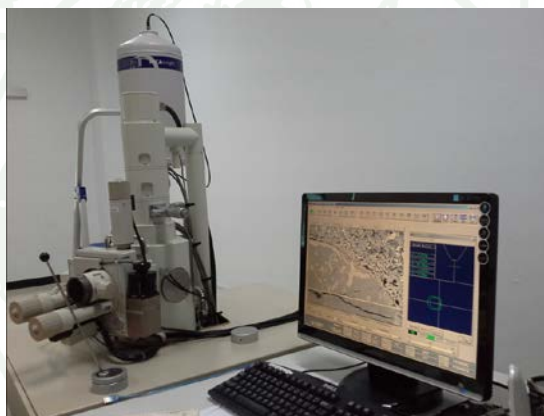
ภาพผนวกที่ ก8 กล้องจุลทรรศน์ออปโตดิจิทัล Olympus DSX500



ภาพผนวกที่ ก9 เครื่องวัดค่าไฟฟ้าไอออน Metrohm 781 pH/Ion meter



ภาพผนวกที่ ก10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Philips XL 30

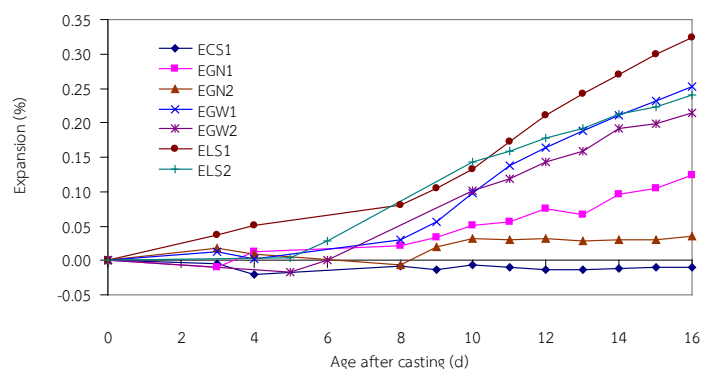


ภาพผนวกที่ ก11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL JSM-6380LV และชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์ OXFORD IE 300



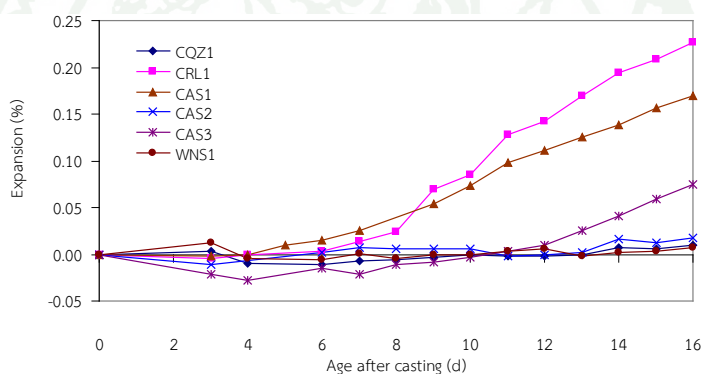
ภาพผนวกที่ ก12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์ Shimadzu Corporation - Superscan SSX-550 SEM-EDX



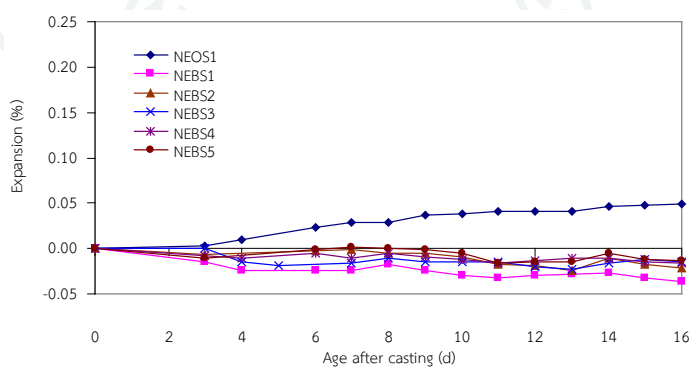


ภาพผนวกที่ ข1 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีแรงปฏิบัติการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวมภาคตะวันออก

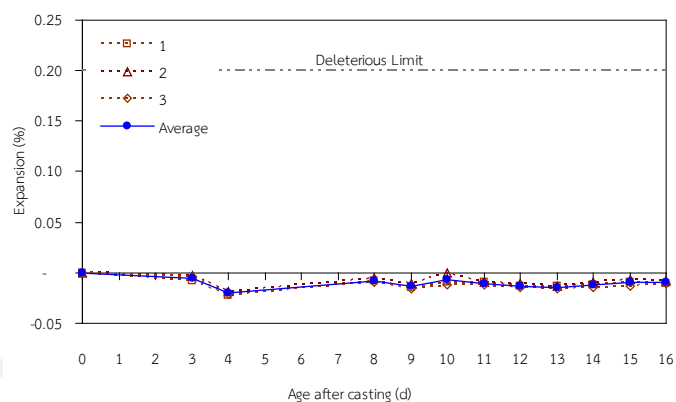
ที่มา: * EGW1 และ ELS1 จาก สุวิมล สัจจาณิชย์ และคณะ (2556)



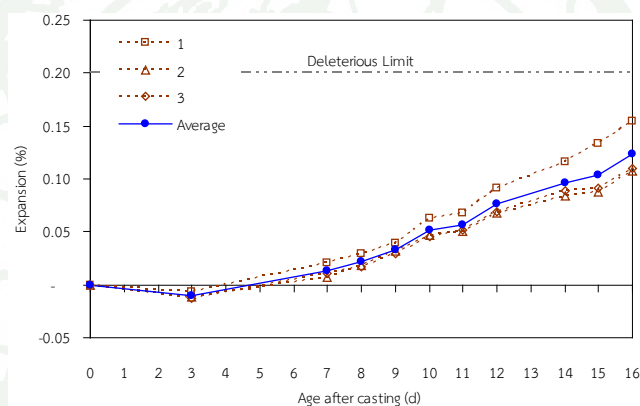
ภาพผนวกที่ ข2 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีแรงปฏิบัติการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวมภาคกลางและภาคตะวันตก



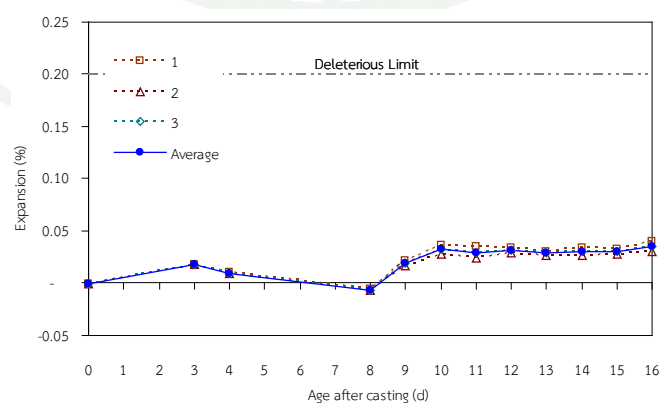
ภาพผนวกที่ ข3 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีแรงปฏิบัติการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ แหล่งมวลรวมภาคตะวันออกเฉียงเหนือ



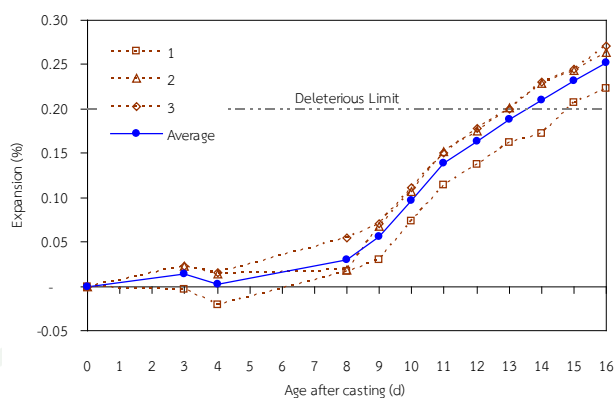
ภาพผนวกที่ ข4 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์
แหล่งมวลรวม ECS1



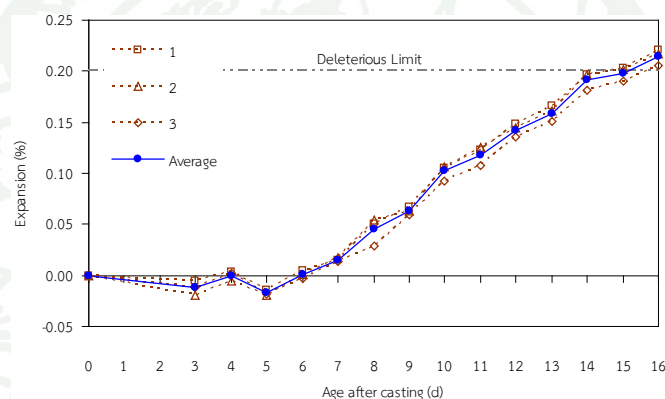
ภาพผนวกที่ ข5 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์
แหล่งมวลรวม EGN1



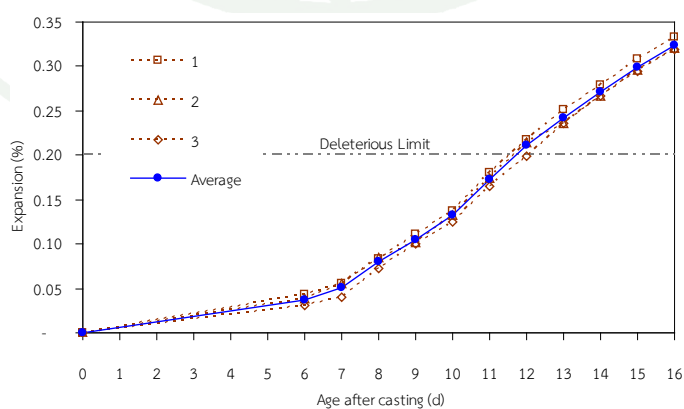
ภาพผนวกที่ ข6 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์
แหล่งมวลรวม EGN2



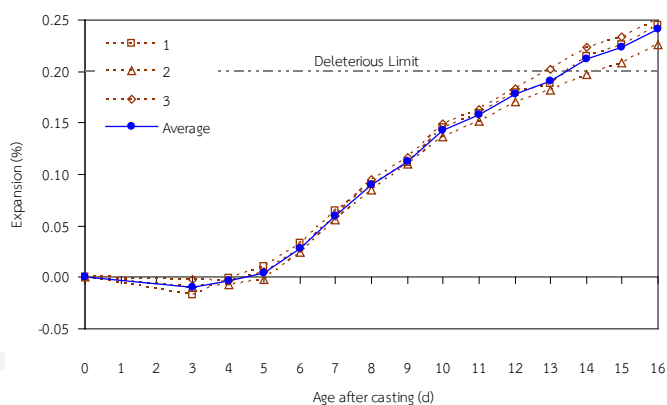
ภาพผนวกที่ ข7 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์
แหล่งมวลรวม EGW1



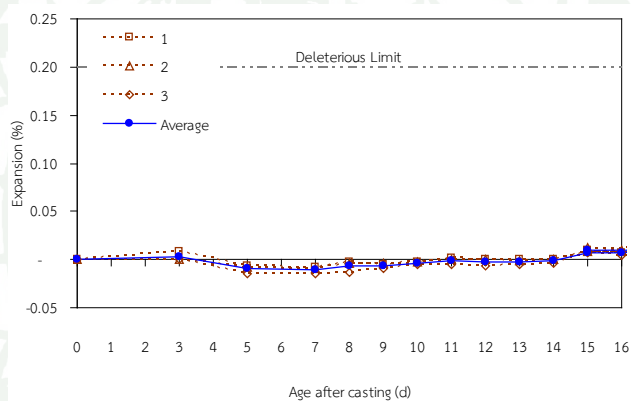
ภาพผนวกที่ ข8 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์
แหล่งมวลรวม EGW2



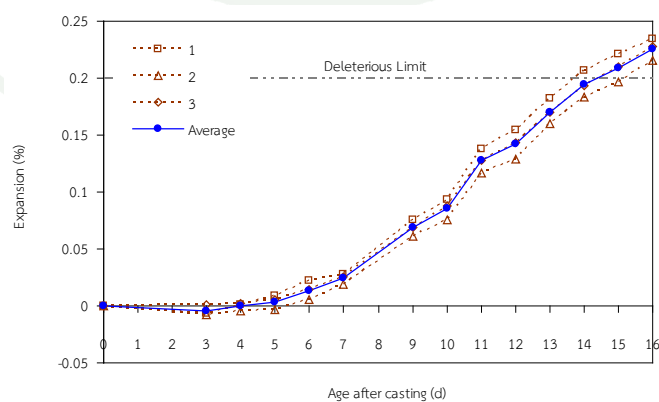
ภาพผนวกที่ ข9 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์
แหล่งมวลรวม ELS1



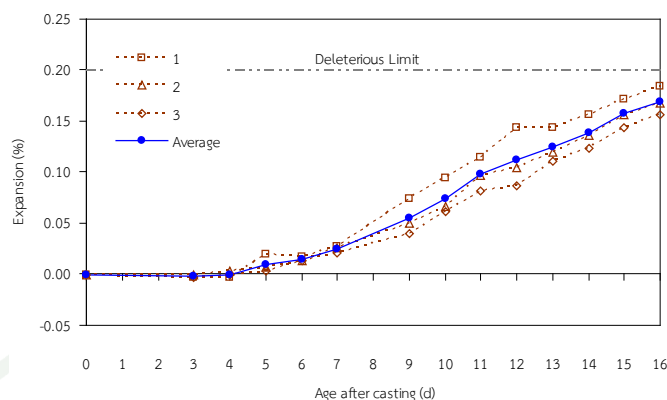
ภาพผนวกที่ ข10 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์
แหล่งมวลรวม ELS2



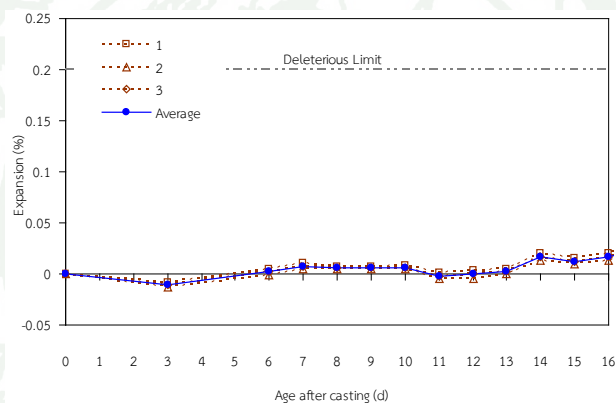
ภาพผนวกที่ ข11 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์
แหล่งมวลรวม CQZ1



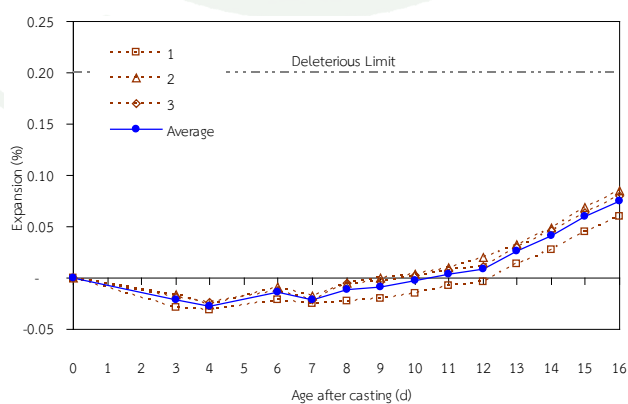
ภาพผนวกที่ ข12 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์
แหล่งมวลรวม CRL1



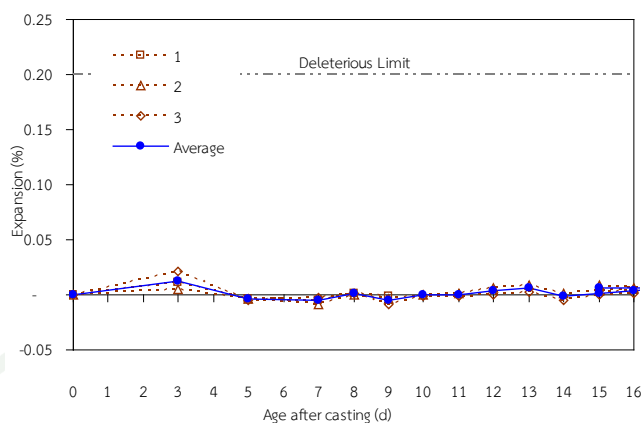
ภาพผนวกที่ ข13 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิบัติการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์
แหล่งมวลรวม CAS1



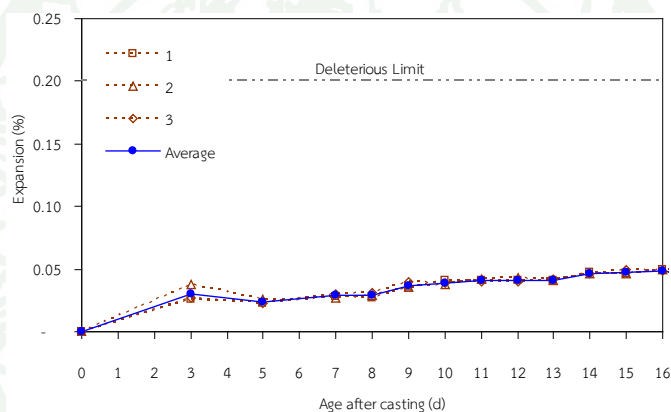
ภาพผนวกที่ ข14 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิบัติการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์
แหล่งมวลรวม CAS2



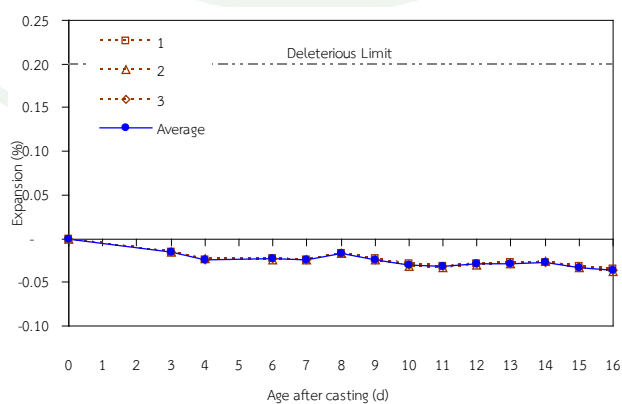
ภาพผนวกที่ ข15 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิบัติการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์
แหล่งมวลรวม CAS3



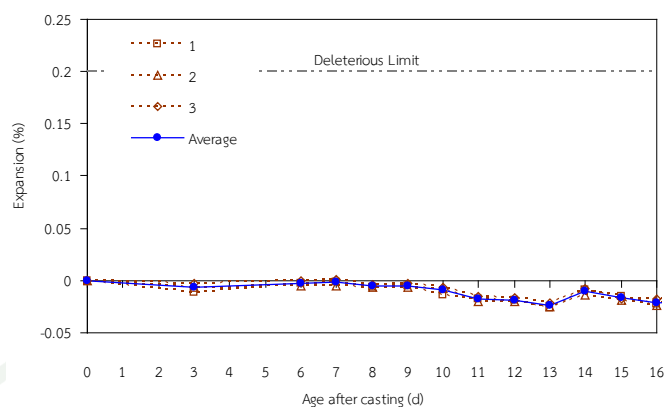
ภาพผนวกที่ ข16 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์
แหล่งมวลรวม WNS1



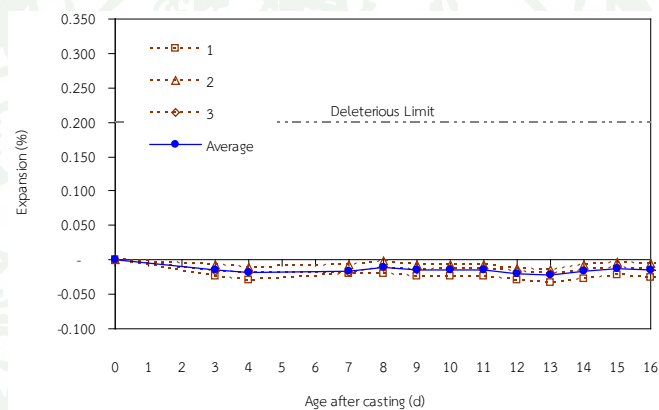
ภาพผนวกที่ ข17 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์
แหล่งมวลรวม NEOS1



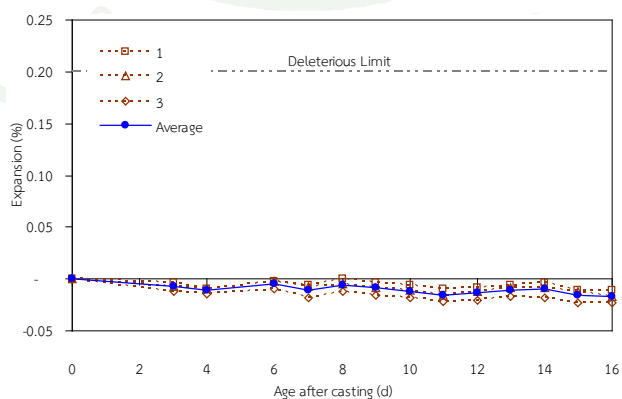
ภาพผนวกที่ ข18 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์
แหล่งมวลรวม NEBS1



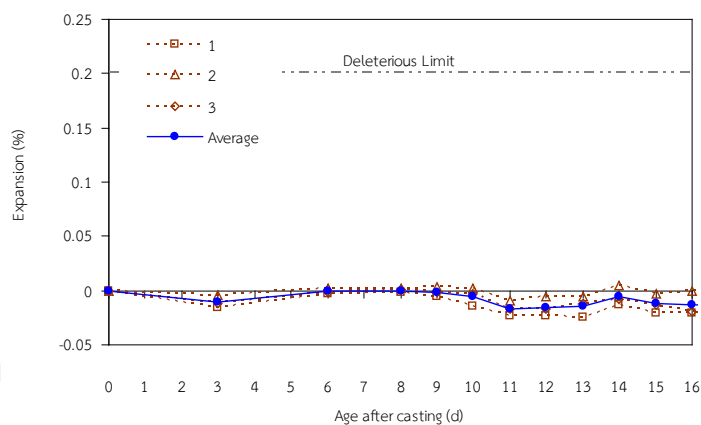
ภาพผนวกที่ ข19 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิบัติการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์
แหล่งมวลรวม NEBS2



ภาพผนวกที่ ข20 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิบัติการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์
แหล่งมวลรวม NEBS3



ภาพผนวกที่ ข21 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิบัติการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์
แหล่งมวลรวม NEBS4



ภาพผนวกที่ ข22 ผลการทดสอบคัดกรองเบื้องต้นด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์
แหล่งมวลรวม NEBS5





ภาพผนวกที่ ค1 แหล่งมวลรวมตัวอย่าง EGW1



ภาพผนวกที่ ค2 แหล่งมวลรวมตัวอย่าง EGW2



ภาพผนวกที่ ค3 แหล่งมวลรวมตัวอย่าง ELS1



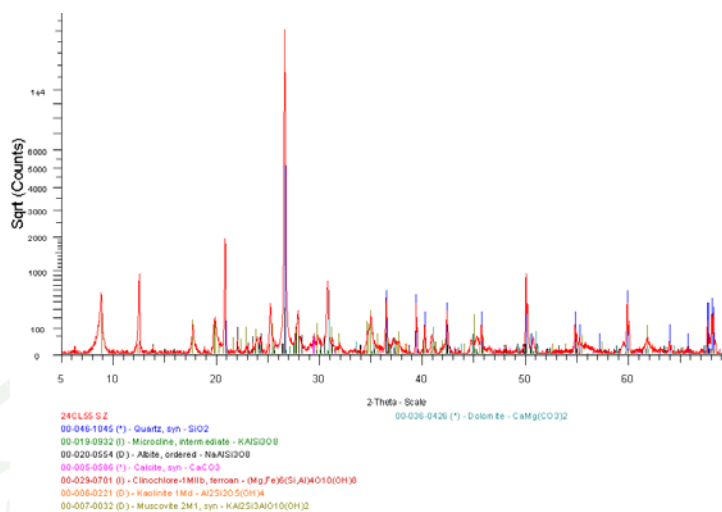
ภาพผนวกที่ ค4 แหล่งมวลรวมตัวอย่าง ELS2



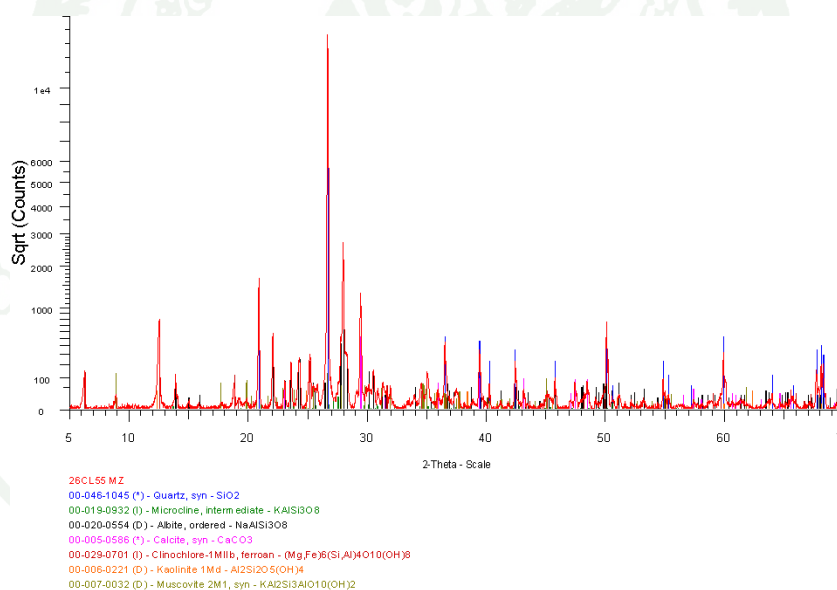
ภาพผนวกที่ ค5 แหล่งมวลรวมตัวอย่าง CRL1



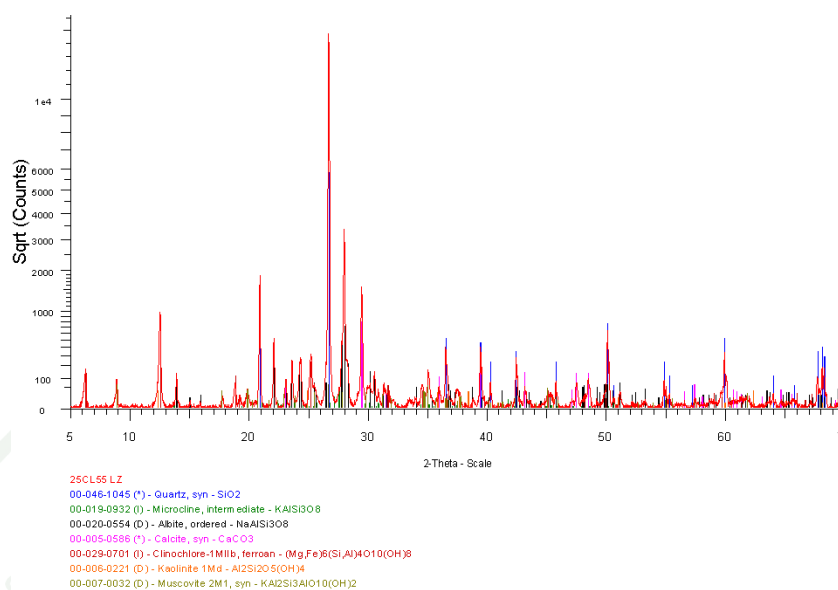
ภาคผนวก ง
การหาค่าประกอบทางเรขาคณิตด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



ภาพผนวกที่ ง1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของมวลรวมด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมวลรวม FZ



ภาพผนวกที่ ง2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของมวลรวมด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมวลรวม MZ

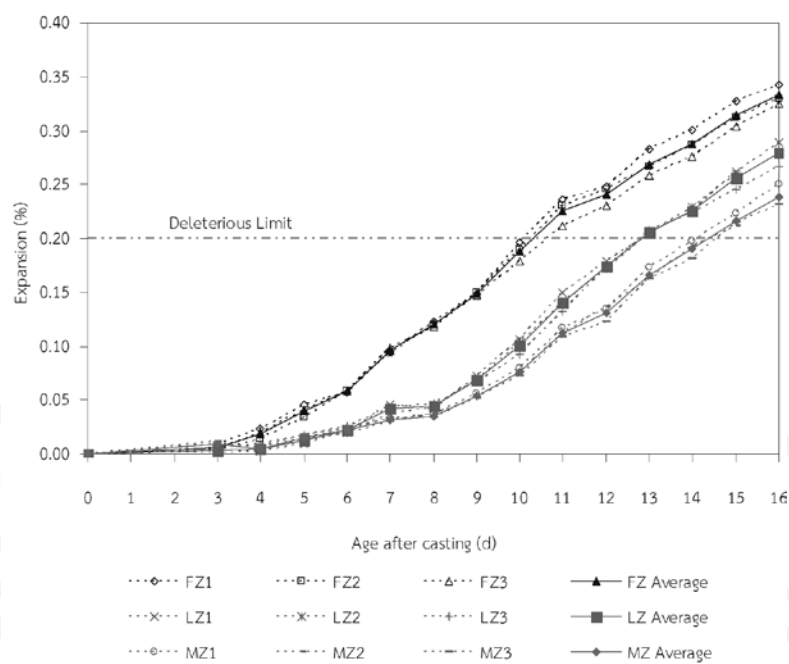


ภาพผนวกที่ ง3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของมวลรวมด้วยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของมวลรวม LZ

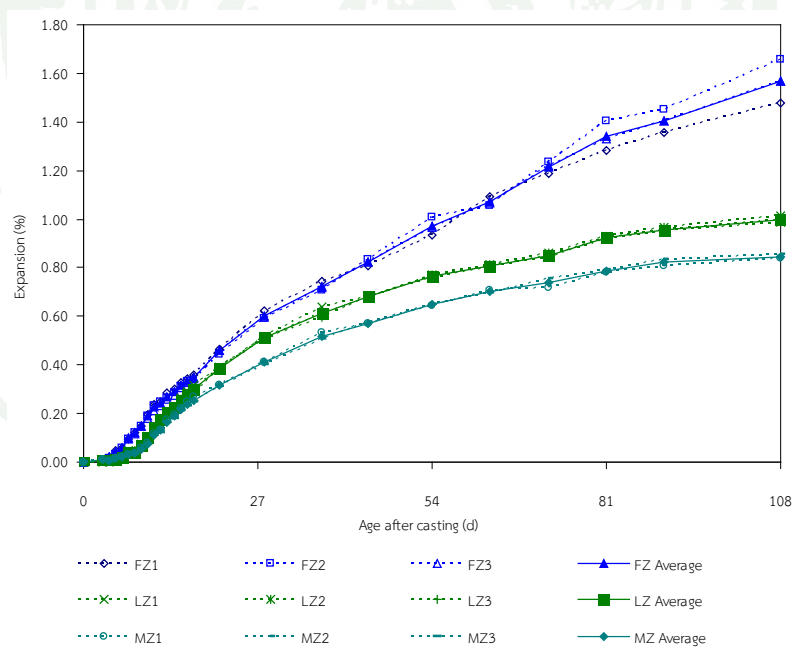


ตารางผนวกที่ จ1 ผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์

Age after casting (d)	Expansion (%)		
	FZ	MZ	LZ
3	0.006	0.010	0.003
4	0.019	0.005	0.005
5	0.040	0.015	0.013
6	0.058	0.022	0.022
7	0.096	0.032	0.042
8	0.120	0.036	0.044
9	0.148	0.054	0.069
10	0.189	0.076	0.100
11	0.226	0.112	0.141
12	0.241	0.131	0.175
13	0.269	0.166	0.206
14	0.288	0.190	0.226
15	0.315	0.217	0.256
16	0.333	0.238	0.279
17	0.348	0.255	0.302
21	0.457	0.315	0.386
28	0.603	0.409	0.512
37	0.723	0.515	0.615
45	0.822	0.572	0.679
54	0.969	0.647	0.766
63	1.072	0.701	0.809
72	1.210	0.738	0.851
81	1.341	0.787	0.925
90	1.405	0.822	0.958
108	1.570	0.845	1.000



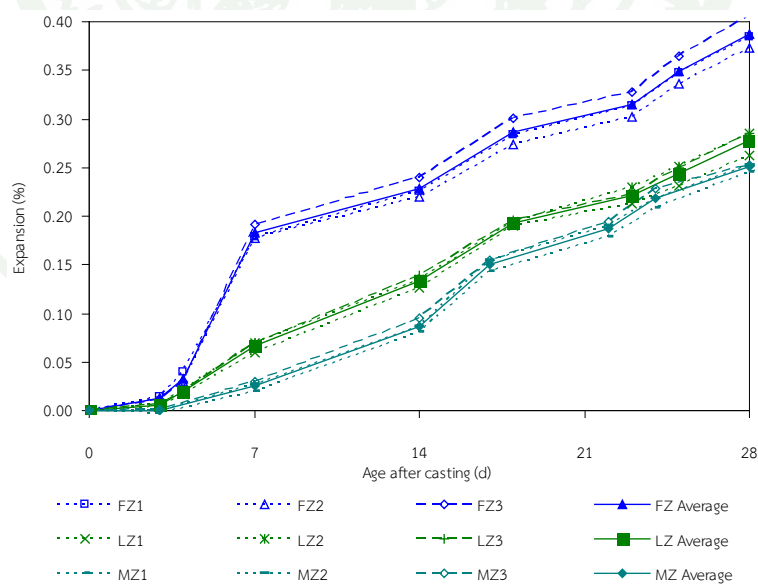
ภาพผนวกที่ จ1 ผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่อายุ 16 วัน



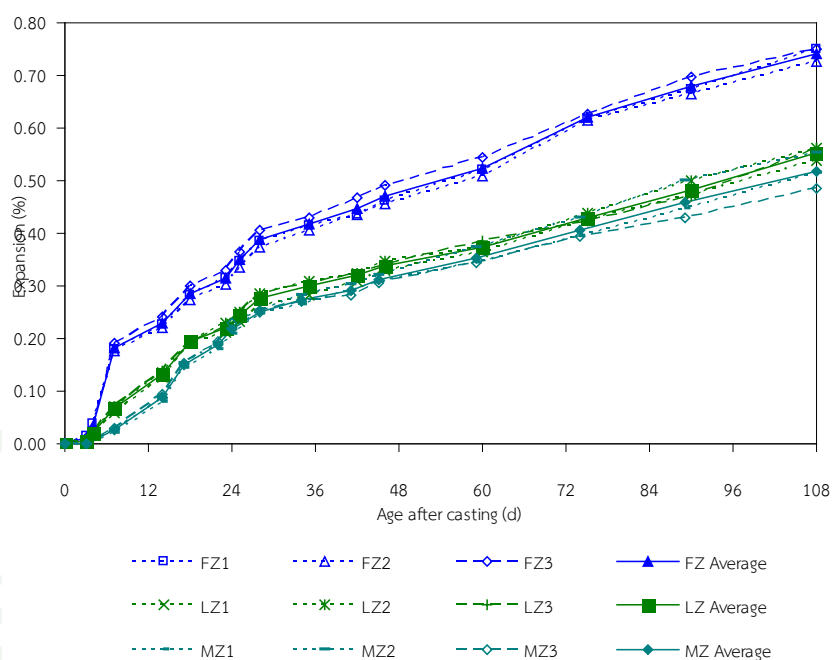
ภาพผนวกที่ จ2 ผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่อายุ 108 วัน

ตารางผนวกที่ จ2 ผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งคอนกรีตไมโครบาร์

Age after casting (d)	Expansion (%)		
	FZ	MZ	LZ
3	0.013	-0.001	0.006
4	0.033	-0.001	0.019
7	0.183	0.026	0.066
14	0.229	0.087	0.133
18	0.286	0.150	0.193
23	0.315	0.188	0.222
25	0.350	0.218	0.244
28	0.387	0.251	0.278
35	0.418	0.272	0.300
42	0.447	0.292	0.320
45	0.469	0.311	0.340
60	0.525	0.354	0.374
75	0.621	0.407	0.430
90	0.679	0.459	0.481
108	0.743	0.517	0.554



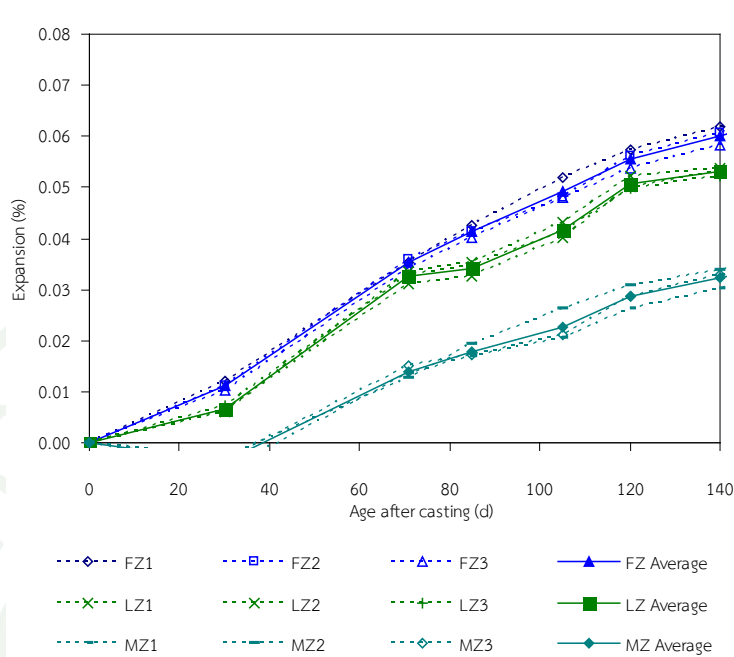
ภาพผนวกที่ จ3 ผลการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาการขยายตัวของแท่งคอนกรีตไมโครบาร์ ที่อายุ 28 วัน



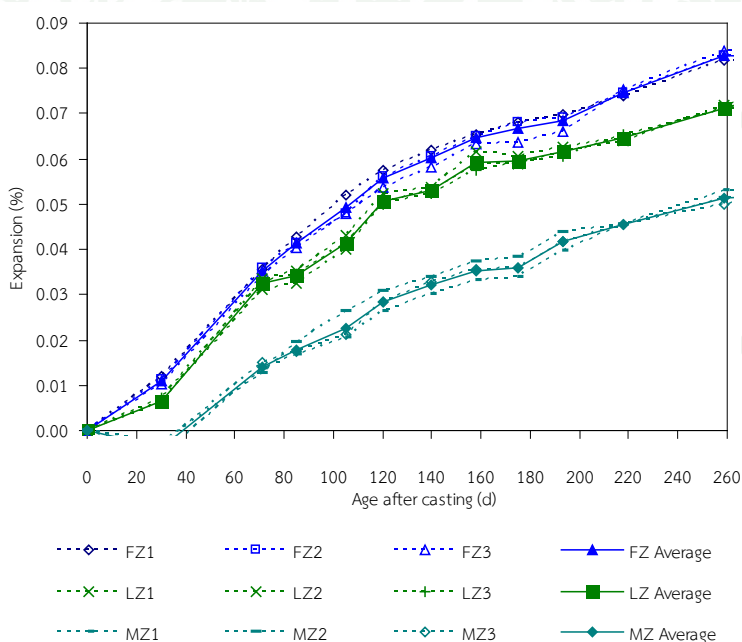
ภาพผนวกที่ จ4 ผลการทดสอบด้วยวิธีแรงปฏิบัติการขยายตัวของแท่งคอนกรีตไมโครบาร์ที่อายุ 108 วัน

ตารางผนวกที่ จ3 ผลการทดสอบด้วยวิธีแรงปฏิบัติการขยายตัวของคอนกรีตปริซึม

Age after casting		Expansion (%)		
weeks	days	FZ	MZ	LZ
5	35	0.011	- 0.004	0.007
10	70	0.035	0.014	0.032
12	85	0.041	0.018	0.035
15	105	0.049	0.023	0.042
17	120	0.056	0.029	0.051
20	140	0.060	0.032	0.053
22	154	0.065	0.035	0.059
25	175	0.067	0.037	0.060
27	189	0.068	0.042	0.062
30	210	0.075	0.046	0.065
37	259	0.083	0.051	0.071

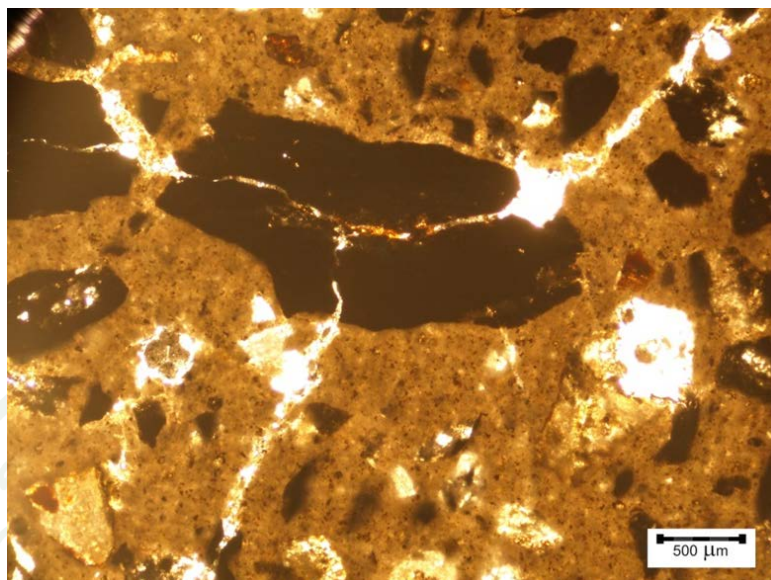


ภาพผนวกที่ จ5 ผลการทดสอบด้วยวิธีแรงปฏิบัติการขยายตัวของคอนกรีตปริซึมที่อายุ 140 วัน

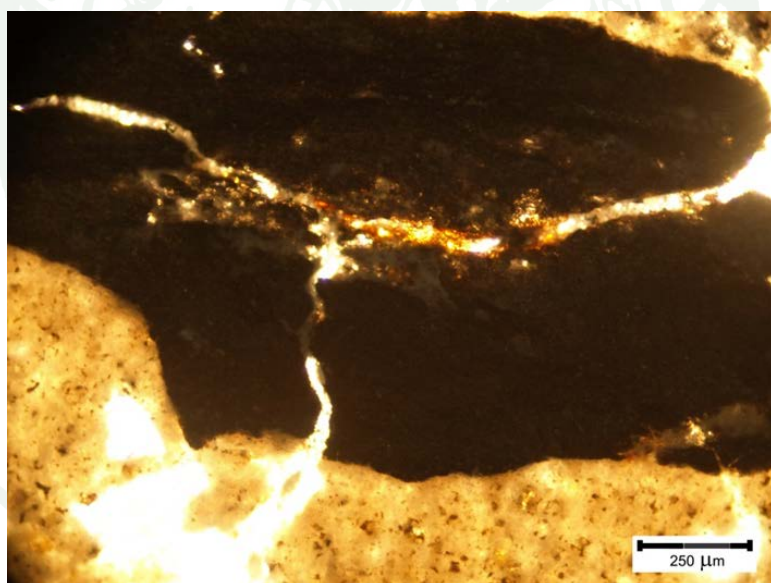


ภาพผนวกที่ จ6 ผลการทดสอบด้วยวิธีแรงปฏิบัติการขยายตัวของคอนกรีตปริซึมที่อายุ 259 วัน



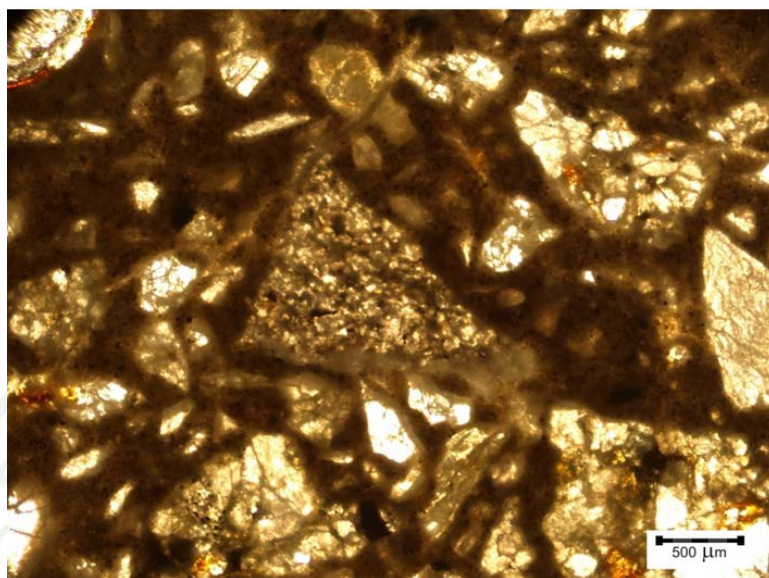


(ก)

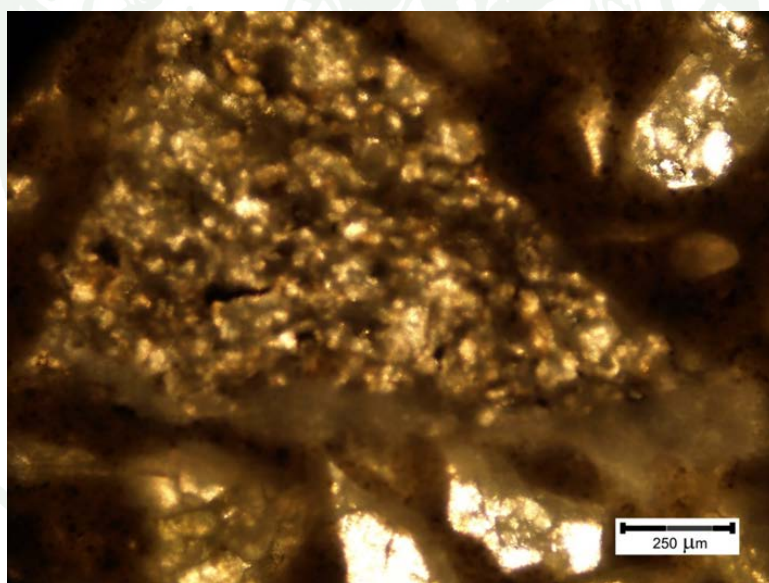


(ข)

ภาพผนวกที่ ๑1 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลของหน้าตัดแบบบางของตัวอย่างแท่งมอร์ต้าร์ของ FZ (ก) ที่กำลังขยาย 40 เท่า (ข) ที่กำลังขยาย 100 เท่า

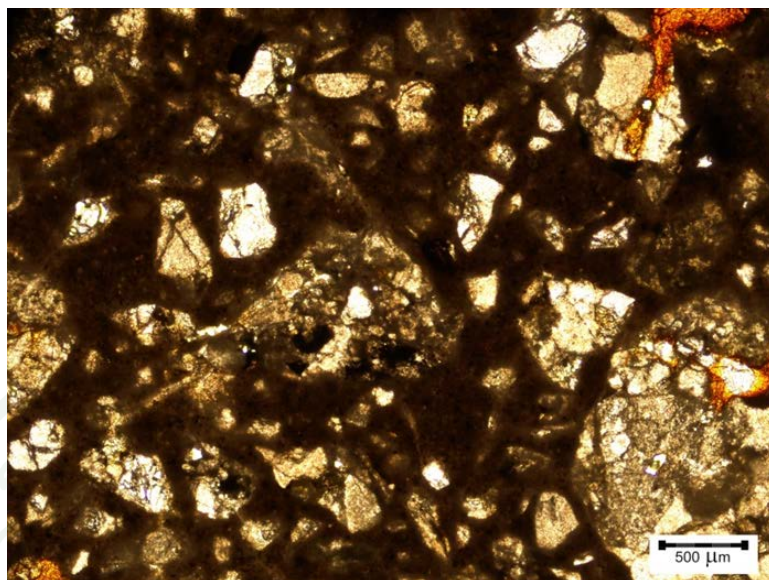


(ก)

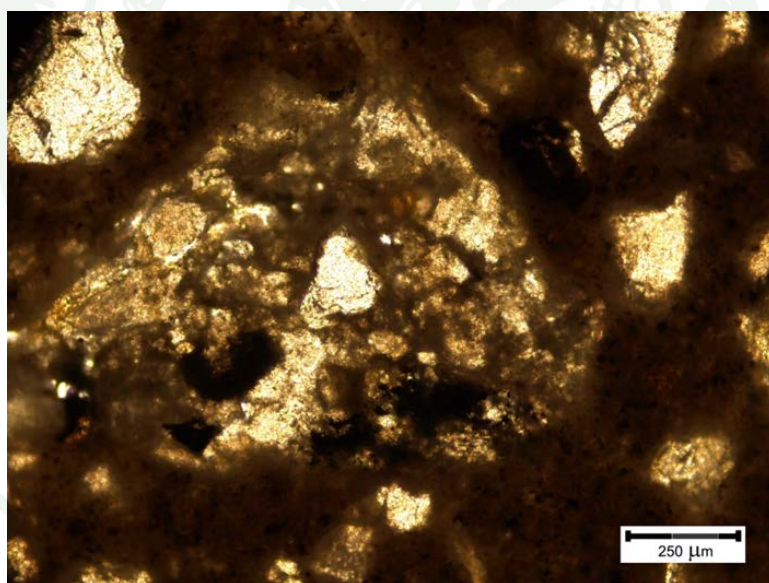


(ข)

ภาพผนวกที่ ๑๒ การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลบนหน้าตัดแบบบางของตัวอย่างแท่งมอร์ต้าร์
ของ MZ (ก) ที่กำลังขยาย 40 เท่า (ข) ที่กำลังขยาย 100 เท่า

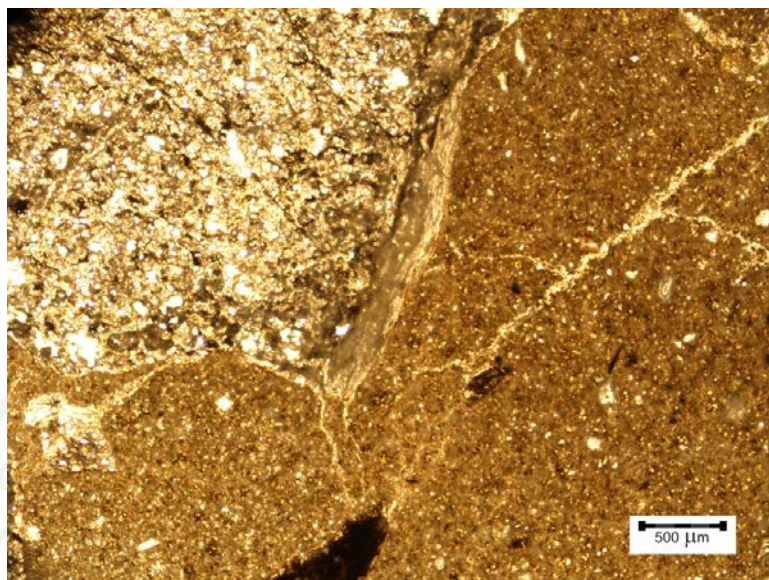


(ก)

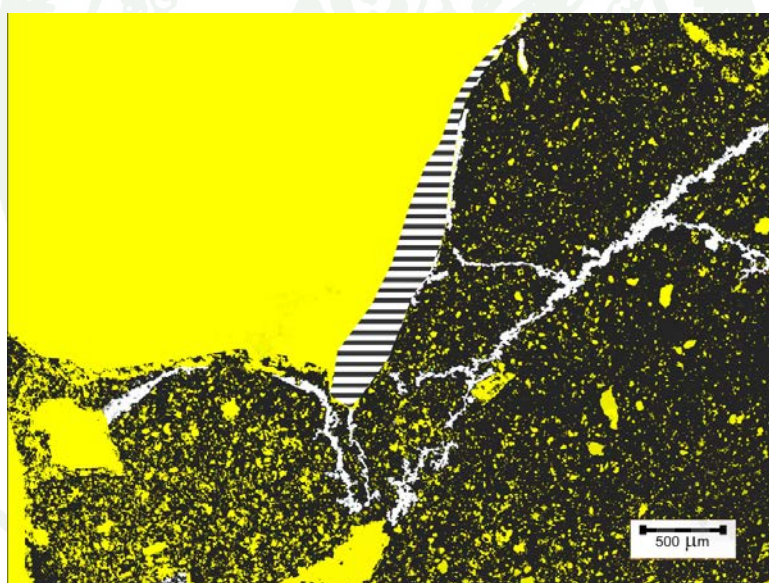


(ข)

ภาพผนวกที่ ๓ การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลของหน้าตัดแบบบางของตัวอย่างแท่งมอร์ตาร์
ของ LZ (ก) ที่กำลังขยาย 40 เท่า (ข) ที่กำลังขยาย 100 เท่า

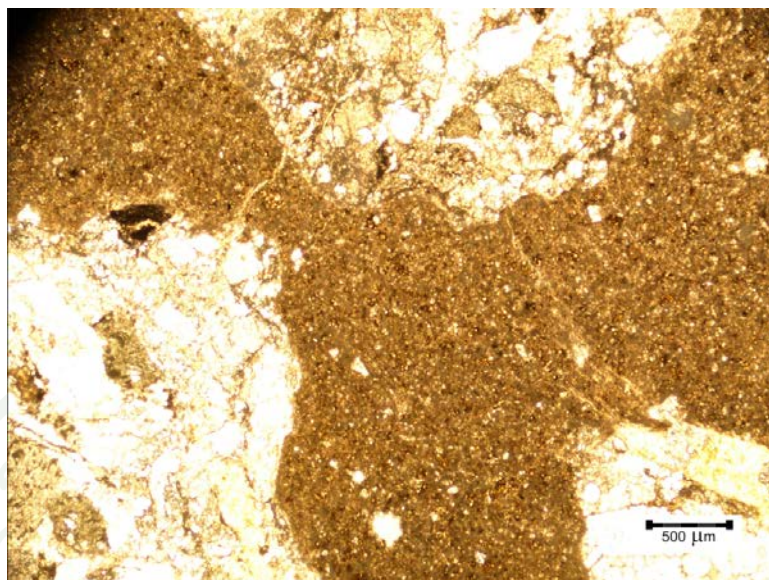


(ก)

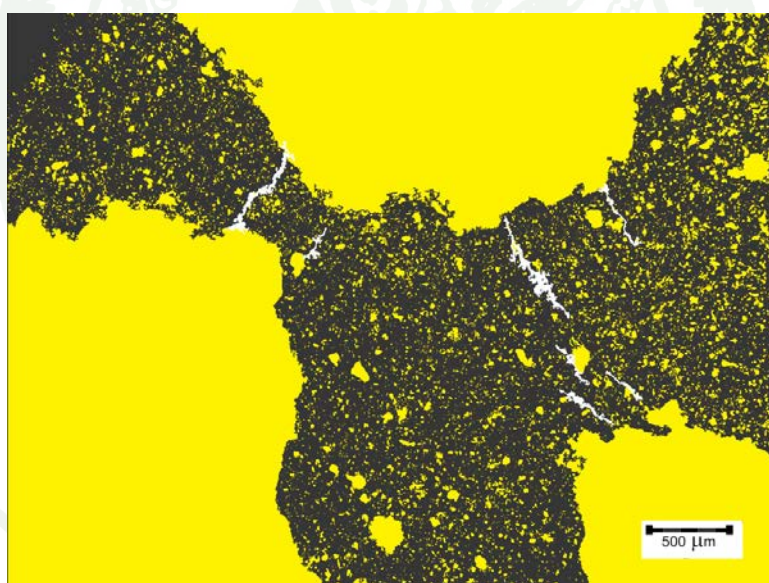


(ข)

ภาพผนวกที่ ๓4 (ก) การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลของตัวอย่างแท่ง
ไมโครบาร์ ของ FZ ที่กำลังขยาย 40 เท่า (ข) การวิเคราะห์ด้วยรูปภาพ

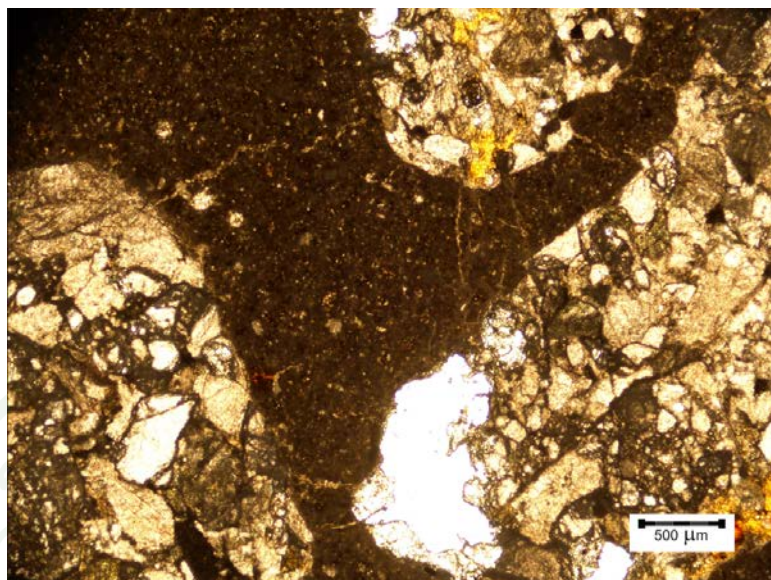


(ก)

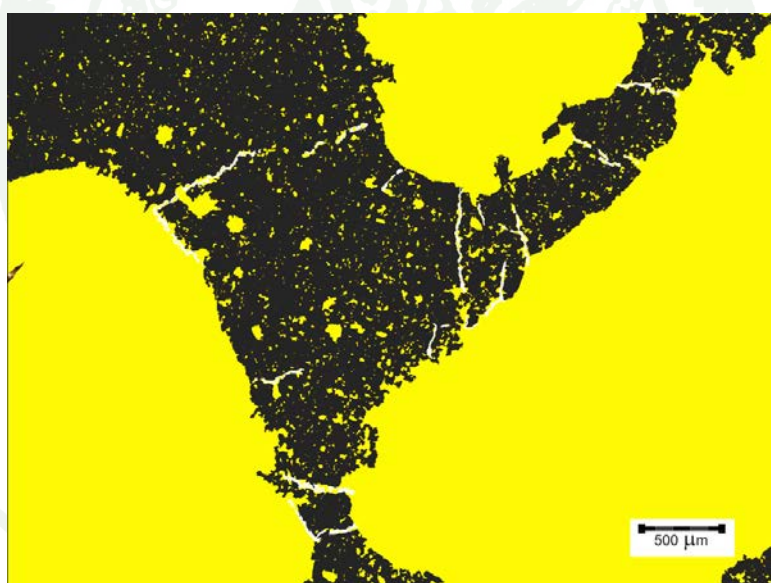


(ข)

ภาพผนวกที่ ๕ (ก) การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลของตัวอย่างแท่งไมโครบาร์ ของ MZ ที่กำลังขยาย 40 เท่า (ข) การวิเคราะห์ด้วยรูปภาพ

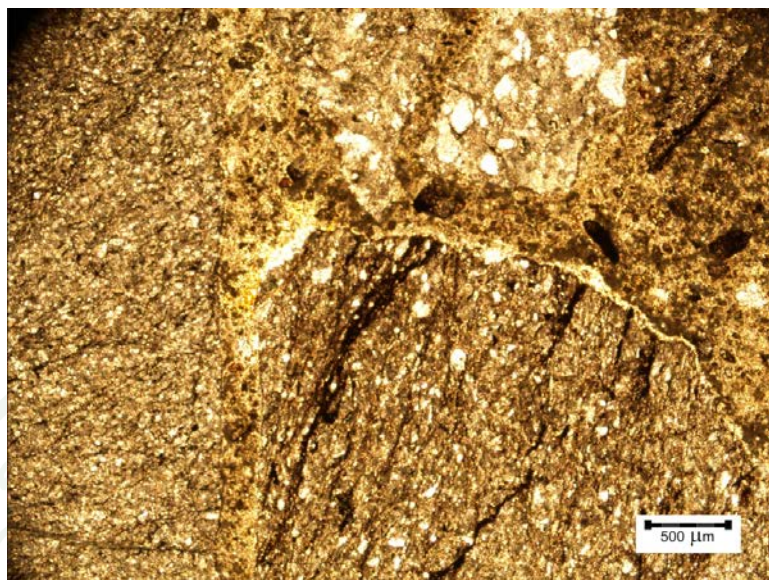


(ก)

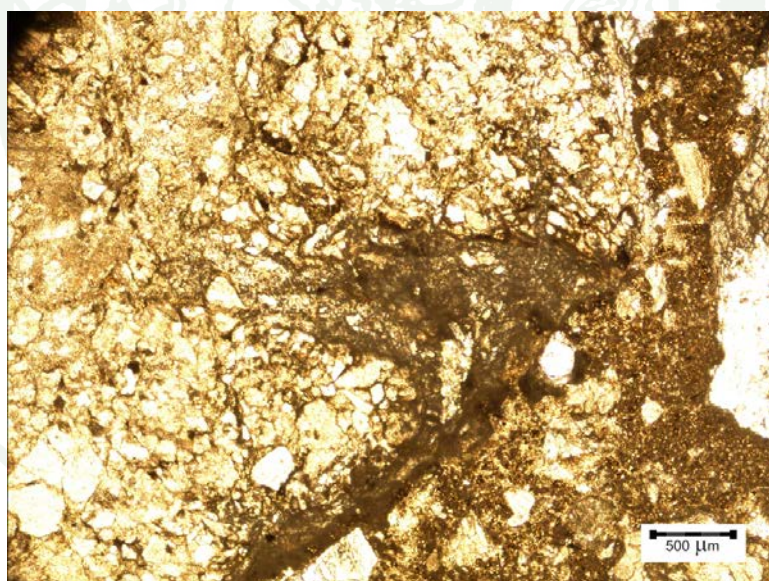


(ข)

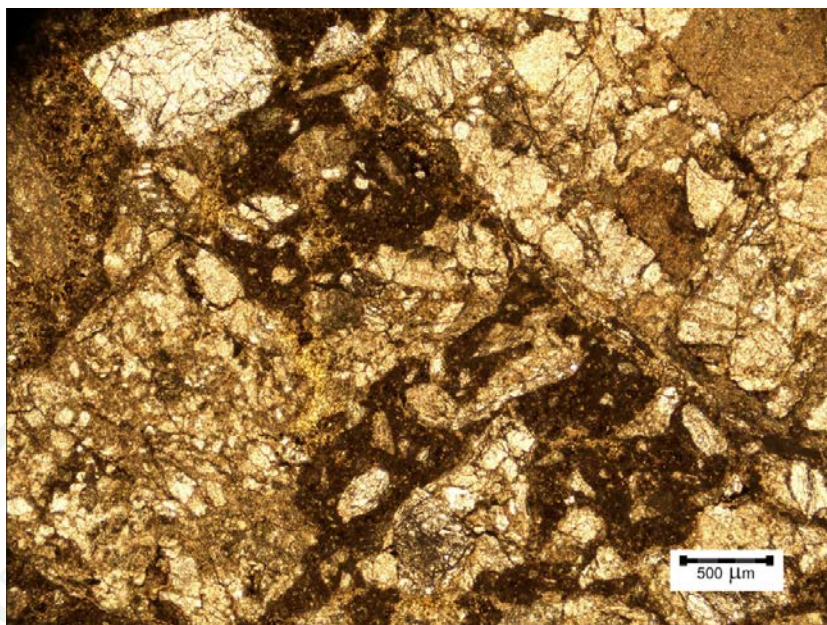
ภาพผนวกที่ ๑๖ (ก) การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลของหน้าตัดแบบบางของตัวอย่างแท่งไมโครบาร์ของ LZ ที่กำลังขยาย 40 เท่า (ข) การวิเคราะห์ด้วยรูปภาพ



ภาพผนวกที่ ฉ7 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลบนหน้าตัดแบบบางตัวอย่างคอนกรีตปริซึม
ของ FZ

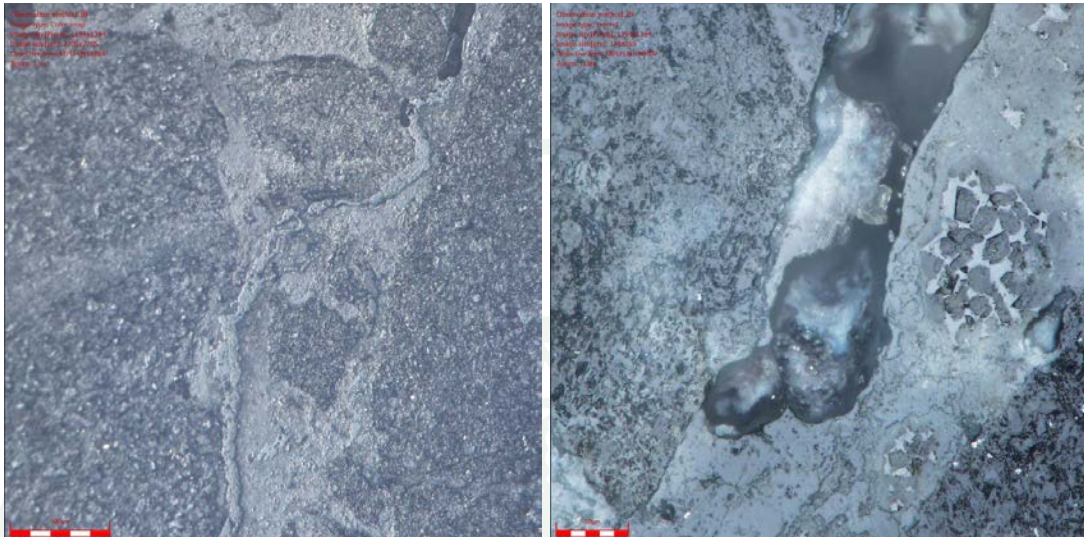


ภาพผนวกที่ ฉ8 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลบนหน้าตัดแบบบางตัวอย่างคอนกรีตปริซึม
ของ MZ



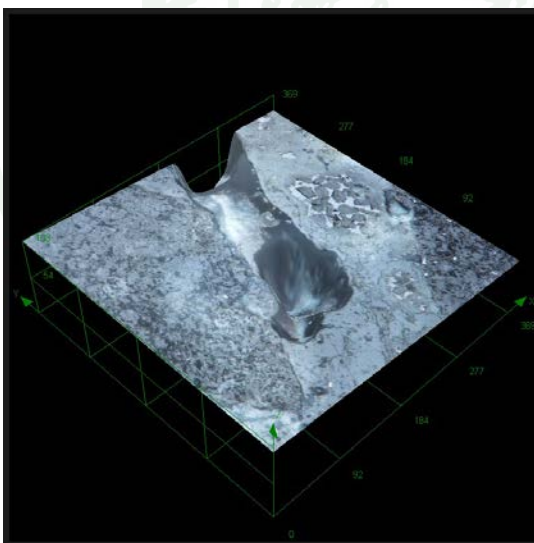
ภาพผนวกที่ ๑๑ การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลหน้าตัดแบบบางตัวอย่างคอนกรีตปริซึม
ของ LZ



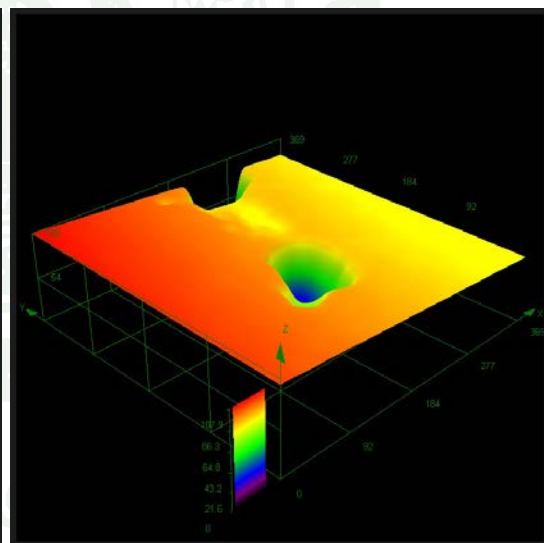


(ก)

(ข)

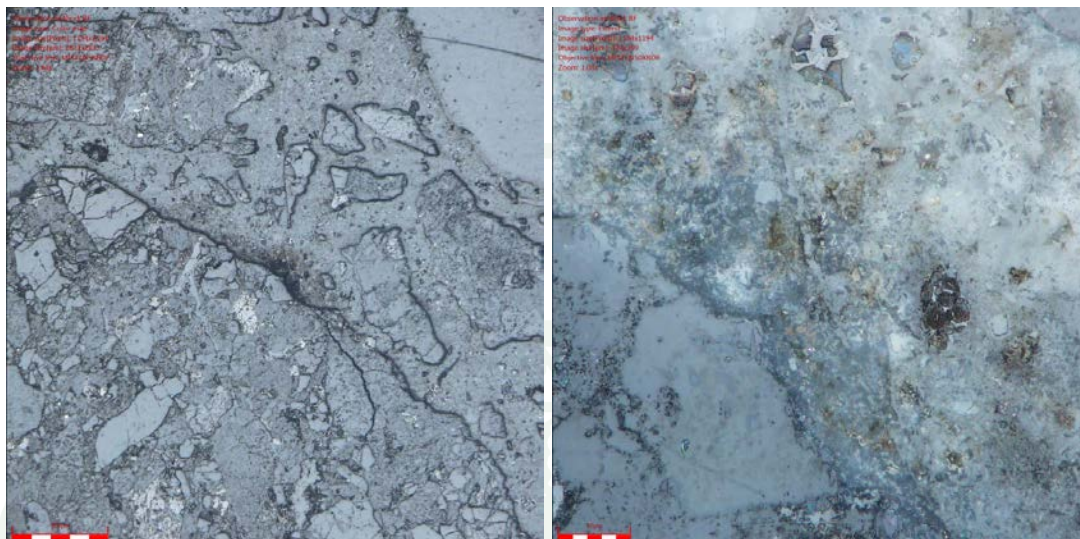


(ค)



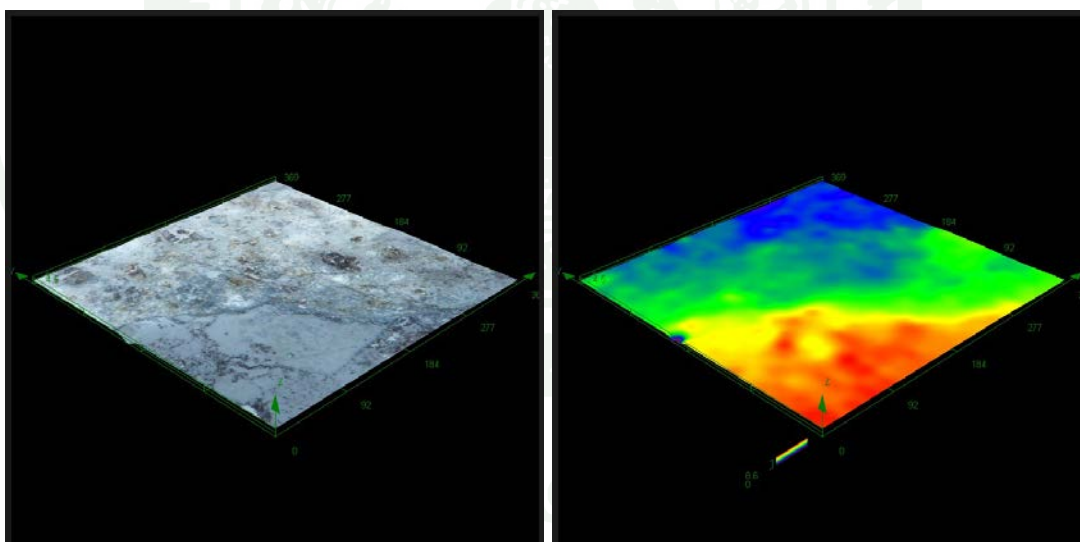
(ง)

ภาพผนวกที่ ข1 การวิเคราะห์หน้าตัดเคลือบและขัดตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตปริซึม ด้วยกล้อง
 ออปโตดิจิทัลของ FZ (ก) แผนที่ของหน้าตัดที่กำลังขยาย 100 เท่า (ข) บริเวณ
 สนใจที่กำลังขยาย 750 เท่า (ค) ภาพ 3 มิติที่กำลังขยาย 750 เท่า (ง) ระดับความ
 ลึกของ (ค)



(ก)

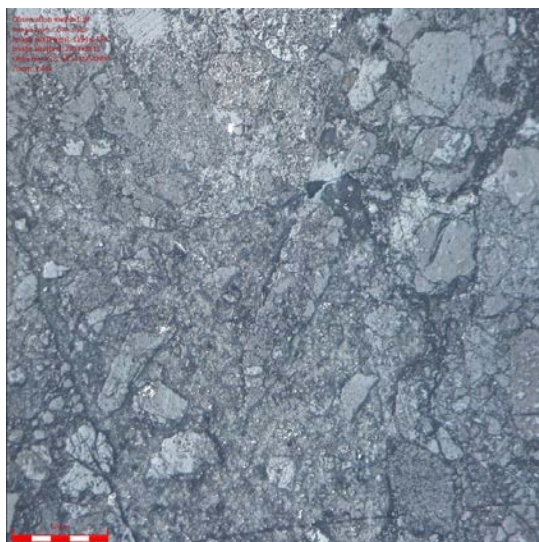
(ข)



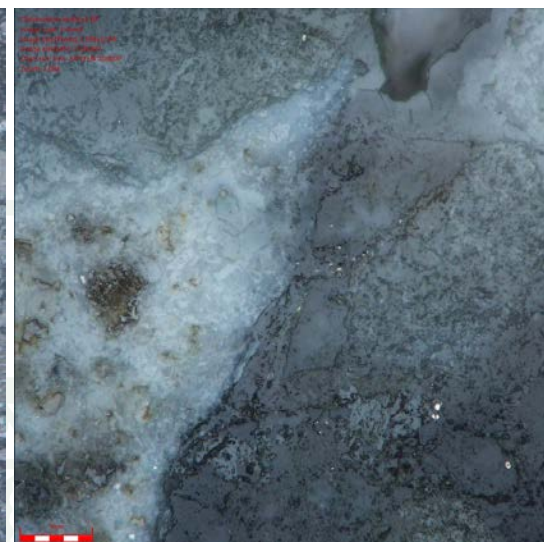
(ค)

(ง)

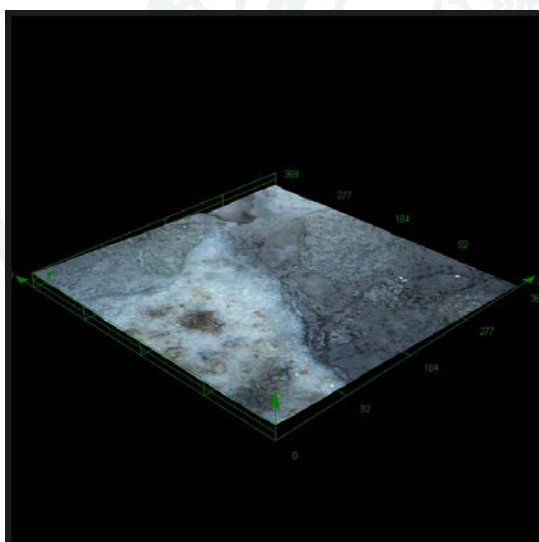
ภาพผนวกที่ ข2 การวิเคราะห์หน้าตัดเคลือบและขัดตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตปรีซึม ด้วยกล้อง
 ออปโตดิจิทัลของ MZ (ก) แผนที่ของหน้าตัดที่กำลังขยาย 100 เท่า (ข) บริเวณ
 สนใจที่กำลังขยาย 750 เท่า (ค) ภาพ 3 มิติที่กำลังขยาย 750 เท่า (ง) ระดับความ
 ลึกของ (ค)



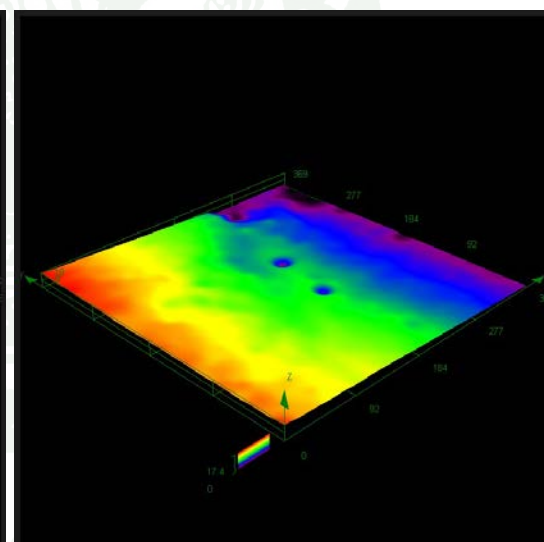
(ก)



(ข)

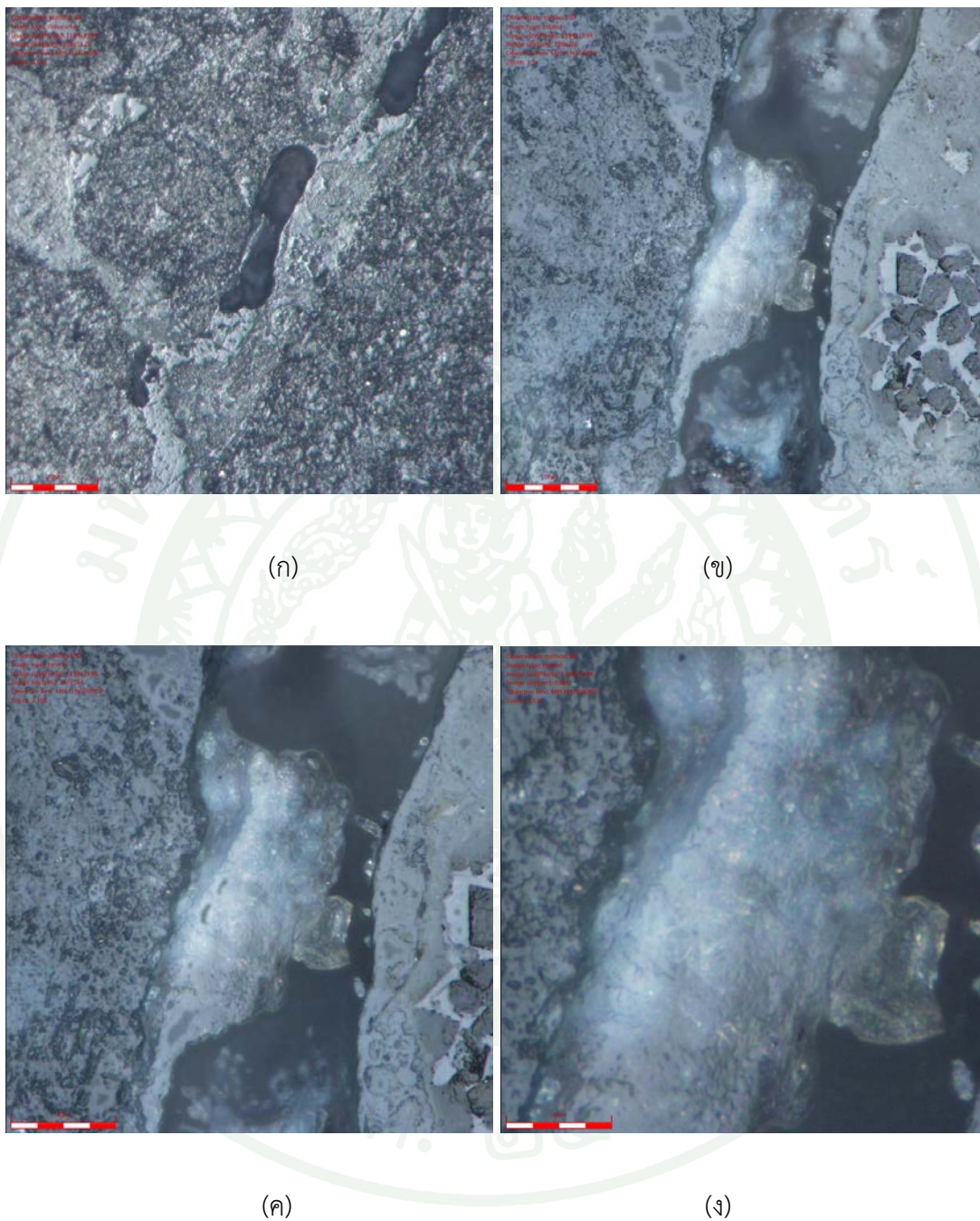


(ค)

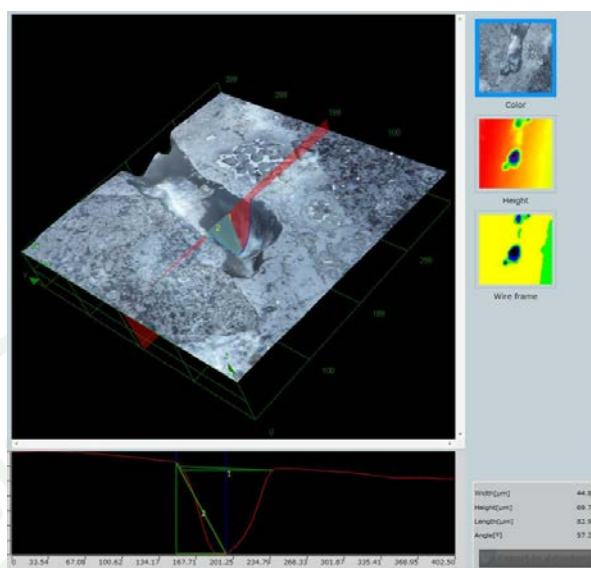


(ง)

ภาพผนวกที่ ข3 การวิเคราะห์หน้าตัดเคลือบและขีดตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตปรีซิม ด้วยกล้อง
 ออปโตดิจิทัลของ LZ (ก) แผนที่ของหน้าตัดที่กำลังขยาย 100 เท่า (ข) บริเวณ
 สนใจที่กำลังขยาย 750 เท่า (ค) ภาพ 3 มิติที่กำลังขยาย 750 เท่า (ง) ระดับความ
 ลึกของ (ค)

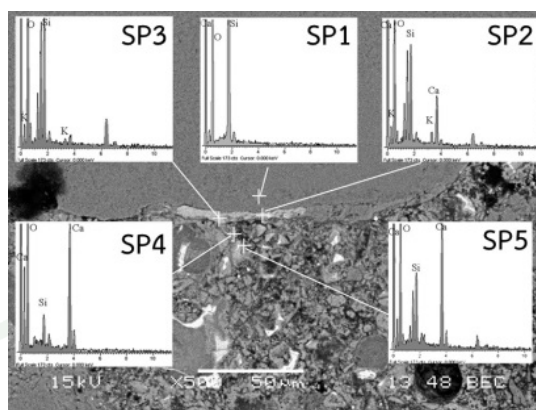


ภาพผนวกที่ ช4 ภาพขยายบริเวณ ITZ (Interface zone) ซึ่งพบเจอจากชิ้นตัวอย่างหน้าตัดเคลือบ และตัดจากตัวอย่างคอนกรีตปริซึม FZ ด้วยกล้องออปโตดิจิทัล ที่กำลังขยาย (ก) 250 เท่า (ข) 1,000 เท่า (ค) 1,500 เท่า และ (ง) 3,000 เท่า

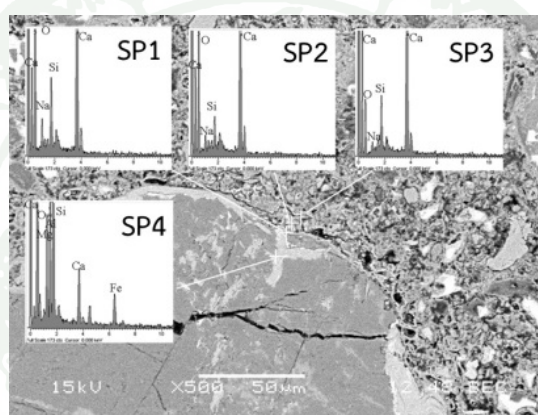


ภาพผนวกที่ ข5 การวัดความลึกของการแตกหลุด (Pitting) ของเจลตัวอย่างคอนกรีตปรีซึมของ
มวลรวม FZ

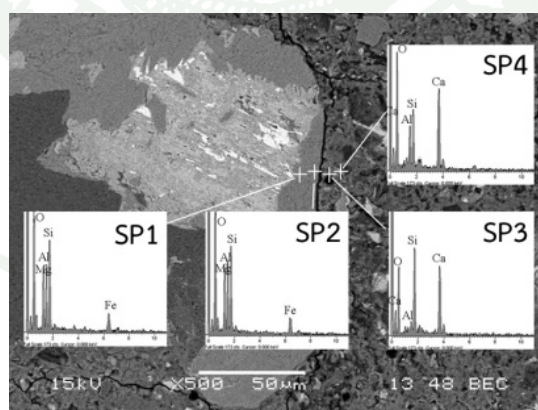




(ก)



(ข)



(ค)

ภาพผนวกที่ ข1 การวิเคราะห์โดยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์ตัวอย่างคอนกรีตปริซึม (ก) FZ (ข) MZ (ค) LZ



ภาคผนวก ณ

ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่เป็นส่วนผสมระหว่างมวลรวม
ที่ทำปฏิกิริยาได้และมวลรวมที่ไม่ทำปฏิกิริยา

ตารางผนวกที่ ๗ ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่เป็นส่วนผสมระหว่างมวลรวม
ที่ทำปฏิกิริยาได้และมวลรวมที่ไม่ทำปฏิกิริยา

Age after casting (d)	Expansion (%)					
	S1B9	S2B8	S4B6	S6B4	S8B2	S100
3	-0.007	-	-0.003	-0.004	-0.001	-0.001
6	-0.007	0.001	0.004	0.016	0.024	0.072
9	-0.006	0.001	0.011	0.035	0.050	0.144
10	-0.009	-0.000	0.009	0.039	0.059	0.180
11	-0.016	-0.002	0.007	0.043	0.068	0.215
12	-0.020	-0.002	0.011	0.050	0.075	0.236
13	-0.025	-0.003	0.014	0.057	0.083	0.257
14	-0.023	-0.004	0.018	0.064	0.093	0.281
15	-0.023	-0.008	0.023	0.072	0.102	0.307
16	-0.028	-0.007	0.028	0.083	0.115	0.318
17	-0.029	-0.004	0.032	0.095	0.127	0.330
18	-0.028	-0.002	0.038	0.106	0.139	0.336
25	-0.014	0.017	0.095	0.163	0.218	0.522
32	-0.007	0.028	0.169	0.229	0.298	0.588
37	-0.013	0.020	0.192	0.254	0.321	0.665
65	-0.009	0.044	0.300	0.377	0.476	0.878



ตารางผนวกที่ ๑ ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีตปรีซึมที่สภาวะแวดล้อมของ
สารละลายโซเดียมคลอไรด์

Age after casting		Expansion (%)				
weeks	days	NA	CD3	CD6	CI3	CI6
5	35	0.011	0.01	0.007	0.01	0.006
10	70	0.035	0.018	0.015	0.007	0.005
15	105	0.049	0.029	0.024	0.011	0.009
20	140	0.06	0.038	0.029	0.013	0.011

ตารางผนวกที่ ๒ ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีตปรีซึมที่สภาวะแวดล้อมของ
สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ในแต่ละบริเวณ

Age after casting		Expansion (%)			
weeks	weeks	CD3			
		Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
5	35	0.029	0.033	0.047	0.069
10	70	0.017	0.039	0.041	0.101
15	105	0.077	0.075	0.154	0.171
20	140	0.107	0.117	0.172	0.222
		CD6			
		Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
5	35	0.014	0.021	0.027	0.031
10	70	0.011	0.021	0.023	0.051
15	105	0.024	0.061	0.122	0.150
20	140	0.029	0.070	0.151	0.162



ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบความเข้มข้นของอีออนในคอนกรีตปรีซีม ภายใต้สภาวะแวดล้อมคลอไรด์

ตารางผนวกที่ ๑1 ผลการทดสอบความเข้มข้นของไอออนในคอนกรีตปรีซีม ภายใต้สภาวะแวดล้อม
คลอไรด์

Sample	Depth (mm)	Zone	Cl- (mg/L)/g	Na+ (mg/L)/g	K+ (mg/L)/g
Age after casting 35 days					
CD3	10.0	4	4.78	32.84	24.02
CD3	10.0	3	20.57	49.96	27.19
CD3	10.0	2	27.27	35.60	13.14
CD3	10.0	1	21.63	31.16	14.38
CD3	20.0	4	1.42	30.07	25.13
CD3	20.0	3	10.36	45.41	26.02
CD3	20.0	2	15.72	33.05	20.53
CD3	20.0	1	11.71	32.68	20.11
CD6	10.0	4	8.92	37.40	24.74
CD6	10.0	3	40.61	60.47	18.46
CD6	10.0	2	49.12	52.19	10.96
CD6	10.0	1	42.83	56.87	13.63
Age after casting 140 days					
CD3	10.0	4	9.35	43.42	17.37
CD3	10.0	3	27.54	55.43	14.00
CD3	10.0	2	33.10	42.78	11.22
CD3	10.0	1	35.63	46.08	10.32
CD3	20.0	4	8.59	48.17	16.42
CD3	20.0	3	16.65	63.08	17.66
CD3	20.0	2	25.80	40.61	13.44
CD3	20.0	1	28.55	46.35	13.77
CD6	10.0	4	33.41	53.27	16.09
CD6	10.0	3	49.66	63.78	13.18
CD6	10.0	2	57.87	57.32	9.46
CD6	10.0	1	61.29	68.97	9.11



ภาคผนวก ก
ค่าการสะท้อนของรังสีเอกซ์และการคำนวณดัชนีความเป็นผลึก

ตารางผนวกที่ ๑1 ค่าการสะท้อนของรังสีเอกซ์และการคำนวณดัชนีความเป็นผลึก

Sample	Zone	c Intensity	b*		a*		a	b	CI
			2 θ	Intensity	2 θ	Intensity			
NA	3	220.00	67.72	940.00	67.84	508.33	431.67	720.00	8.99
CD3	3	271.67	67.68	901.67	67.78	486.67	415.00	630.00	9.88
CD6	3	320.00	67.72	885.00	67.82	485.00	400.00	565.00	10.62
CI3	3	376.67	67.70	1,251.67	67.82	660.00	591.67	875.00	10.14
CI6	3	355.00	67.76	1,055.00	67.86	570.00	485.00	700.00	10.39
CD3	1	278.33	67.72	1,040.00	67.82	536.67	503.33	761.67	9.91
CD3	2	312.00	67.72	891.67	67.84	508.33	383.33	579.67	9.92
CD3	3	271.67	67.68	901.67	67.78	486.67	415.00	630.00	9.88
CD3	4	278.33	67.72	961.67	67.84	546.67	415.00	683.33	9.11
CD6	1	373.33	67.64	988.33	67.72	538.33	450.00	615.00	10.98
CD6	2	275.00	67.70	1,050.00	67.78	481.67	568.33	775.00	11.00
CD6	3	320.00	67.72	885.00	67.82	485.00	400.00	565.00	10.62
CD6	4	271.67	67.72	1,010.00	67.82	511.67	498.33	738.33	10.12

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ -นามสกุล	นายวัชรกร วงศ์คำจันทร์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2517
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ บธ.บ. (การจัดการงานก่อสร้าง) มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด กระทรวงศึกษาธิการ
ผลงานดีเด่นและ/หรือ รางวัลทางวิชาการ	ข้าราชการพลเรือนดีเด่น กระทรวงศึกษาธิการ พ.ศ. 2551
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ปริญญาตรี ทุนมูลนิธิปูนซิเมนต์ไทย ปริญญาโท ทุนโครงการพัฒนาการเรียนการสอนวิทยาศาสตร์และ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ ในมหาวิทยาลัยราชภัฏ (World Bank Project) ปริญญาเอก ทุนสนับสนุนการทำวิจัย ณ ต่างประเทศ โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษา สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา