



ผลของเส้นใย PVA ต่อการขยายตัวของหินปูนจาก ASR IMPACT OF PVA FIBERS ON ASR EXPANSION OF LIMESTONE

วุดินันต์ ทศกร¹ และสุวิมล สัจจานิชย์²

¹วิศวกรโยธา, สำนักสำรวจและออกแบบ กรมทางหลวง

²รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ

บทความนี้รายงานการศึกษาลักษณะของเส้นใย Polyvinyl Alcohol (PVA) ต่อการขยายตัว กำลังรับแรงอัดและโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่เกิดปฏิกิริยาแอลคาไล-ซิลิกาจากหินปูนบางชนิด โดยศึกษาด้วยแท่งตัวอย่างขนาด 4.0x4.0x19.5 ซม. และ 5.0x5.0x5.0 ซม. ที่ผันแปรปริมาณเส้นใยระหว่างร้อยละ 0.00-1.00 โดยปริมาตร และเร่งปฏิกิริยาเคมีตามข้อแนะนำของ RILEM AAR-2 เป็นเวลา 28 และ 56 วัน จากการศึกษาพบว่า สภาวะการบ่มก่อนเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการขยายตัวโดยแท่งตัวอย่างที่มีเส้นใย PVA ร้อยละ 1.00 ที่บ่มในอากาศ 2 วัน แล้วบ่มด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 80 °C อีก 1 วัน ลดการขยายตัวลงร้อยละ 16 และมีแนวโน้มดีขึ้นโดยลำดับ ขณะที่ส่วนผสมชุดอื่นๆ มีการขยายตัวใกล้เคียงกับชุดควบคุมที่ไม่ผสมเส้นใย เมื่อบ่มแท่งตัวอย่างด้วยน้ำ 80 °C ต่อเนื่อง 3 วัน การขยายตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยแท่งตัวอย่างที่ผสมเส้นใย PVA มีการขยายตัวต่ำกว่าชุดควบคุมร้อยละ 16 และมีแนวโน้มดีขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกัน และพบว่าประสิทธิภาพในการรักษากำลังรับแรงอัดและโมดูลัสความยืดหยุ่นไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใยและมีแนวโน้มลดลงตามความรุนแรงของปฏิกิริยา โดยมวลรวมที่เห็นการเปลี่ยนแปลงบริเวณขอบชัดเจน กำลังรับแรงอัดจะได้รับผลกระทบในระดับที่สูงกว่า ทั้งนี้กลุ่มตัวอย่างที่เร่งปฏิกิริยา 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ำกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ไม่เร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3-28 และร้อยละ 3-10 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ปฏิกิริยาแอลคาไล-ซิลิกา หินปูน เส้นใย PVA การขยายตัว กำลังรับแรงอัด โมดูลัสความยืดหยุ่น

ABSTRACT

This paper reported the effects of Polyvinyl Alcohol (PVA) fiber on expansion, compressive strength and modulus of elasticity (E) of concrete subjected to Alkali-Silica Reaction (ASR) from some type of limestone aggregates. Samples of 4.0x4.0x19.5 cm. and 5.0x5.0x5.0 cm., varying percentage of PVA by volume (0.00-1.00), were studied. The accelerated condition according to RILEM AAR-2 provision for short and long term (28 and 56 days) was used in the study. The impact of curing condition before the samples subjected to accelerated condition was observed. The expansion of 1.00% PVA samples under curing condition of 2 days in room temperature and 1 day in 80 °C water significantly decreased by 16% while that of the rest was in same range of the control (0.00% PVA). For the extended curing in 80 °C water to 3 days, the expansion of the control samples was slightly larger than that of the first case. Fibers appeared to reduce expansion of about 16% for all mixtures with PVA and the trend of continued improvement was observed. Compressive strength and E appeared to be fiber content-independent but decreased when the accelerated time increased. In case of dark rim aggregates was observed, the impact on compressive strength was larger than that of E. Both compressive strength and E of those samples subjected to 28 days acceleration were lower than those of non ASR of about 3-28% and 3-10% respectively.

KEYWORD: Alkali-Silica Reaction, Limestone, PVA Fiber, Expansion, Compressive Strength, Modulus of Elasticity

1. บทนำ

ปัญหาแอลคาไล-ซิลิกา (Alkali-Silica Reaction, ASR) เป็นการเสื่อมสภาพทางเคมีรูปแบบหนึ่งที่ทำให้คอนกรีตขยายตัวมากกว่าปกติจนนำไปสู่การแตกร้าวและความเสียหายอื่นๆ โดยมีสาเหตุจากการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาในมวลรวมบางประเภทที่มีโครงสร้างผลึกแบบไม่สมบูรณ์ (Disordered) แบบจลน์ผลึก (Crypto-crystalline) หรือแบบอสัณฐาน (Amorphous) กับต่างในปูนซีเมนต์ซึ่งทำให้เกิดแอลคาไล-ซิลิกาเจลที่มีสมบัติในการดูดซับความชื้นและขยายตัว ทั้งนี้เมื่อเจลได้รับความชื้นในปริมาณที่มากพอจะขยายตัวจนส่งผลต่อคอนกรีตที่อยู่โดยรอบทำให้เกิดหน่วยแรงดึงและอาจรุนแรงถึงขั้นแตกร้าวได้ [1] สำหรับประเทศไทยมีการค้นพบปัญหาแอลคาไล-ซิลิกาครั้งแรกและเผยแพร่ผลการศึกษาย่างเป็นทางการในปี 2554 [2] เป็นที่คาดการณ์ว่าสิ่งก่อสร้างในปัจจุบันอาจมีความเสี่ยงต่อปัญหาดังกล่าวมากขึ้น เนื่องจากเริ่มขาดแคลนแหล่งมวลรวมผสมคอนกรีตที่มีคุณภาพ รวมถึงมีข้อจำกัดในการเข้าถึงแหล่งทรัพยากรแห่งใหม่ๆ อย่างเช่นการให้สัมปทานที่ยากขึ้น นอกจากนี้ผลการศึกษาที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่ามีแหล่งมวลรวมภายในประเทศหลายแห่งที่มีแนวโน้มการเกิดปัญหา ASR [3] ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพของคอนกรีตด้วยการผสมเส้นใย Polyvinyl Alcohol (PVA) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความคงทนสูง สามารถต้านทานหน่วยแรงดึงได้ดีและไม่ทำปฏิกิริยากับส่วนผสมอื่น ประกอบกับปัจจุบันมีการใช้เส้นใยดังกล่าวควบคุมรอยแตกร้าวจากการหดตัวในสภาวะพลาสติกและสภาวะแห้งของคอนกรีตอยู่แล้ว ทั้งนี้หากมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อนำไปสู่การลดผลกระทบจากปัญหา ASR จะเป็นประโยชน์เพิ่มขึ้นอีกชั้นหนึ่ง โดยเป้าหมายหลักของการวิจัยคือ ศึกษาผลกระทบของเส้นใย PVA ต่อการขยายตัวและการรักษาสมบัติทางกลของคอนกรีตที่เกิดปฏิกิริยา ASR

บทความนี้ศึกษาพฤติกรรมการขยายตัว กำลังรับแรงอัด โมดูลัสความยืดหยุ่น และรายละเอียดระดับจุลภาคของคอนกรีตผสมเส้นใย PVA ที่เกิดปฏิกิริยา ASR ในระดับที่ยังไม่เกิดการแตกร้าว โดยใช้เส้นใยขนาด 0.10x12.0 มิลลิเมตร ซึ่งผันแปรปริมาณระหว่างร้อยละ 0.00 ถึง 1.00 โดยปริมาตร ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการคัดเลือกแนวทางป้องกันปัญหา ASR สำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่มีความเสี่ยงต่อไป

2. วัสดุและวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่มีความเป็นด่างเทียบเท่า ($\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$) มากกว่าร้อยละ 0.60 โดยผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์แสดงไว้ในตารางที่ 1 สำหรับมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยหินปูนที่มีแนวโน้มการเกิดปัญหาและเศษแก้วบด (เศษแก้วบดใช้เพื่อยกระดับความรุนแรงของปฏิกิริยาแอลคาไล-ซิลิกา) [4-5] โดยหินปูนมีแร่ประกอบหินขนาด 0.50-1.00 มม. ซึ่งได้แก่ แคลไซต์ประมาณร้อยละ 99 และแร่อื่นๆ ประมาณร้อยละ 1.00 สำหรับเศษแก้วที่ใช้เป็นแก้วอ่อน (Soda-Lime Glass) ไม่มีสี โดยเตรียมจากภาชนะบรรจุเครื่องดื่มดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) ทั้งนี้ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ สมบัติทางกายภาพของมวลรวม รายละเอียดของส่วนผสมคอนกรีต และรูปร่างของหินปูนแสดงไว้ในตารางที่ 1-2 และรูปที่ 1 (ก) ตามลำดับ

เส้นใย PVA ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นเส้นใยสังเคราะห์ชนิดยืดหยุ่นสูงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวเท่ากับ 0.10x12.0 มิลลิเมตร หรือมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (Aspect Ratio) เท่ากับ 130 มีหน่วยน้ำหนัก 1300 กก./ม.³ กำลังรับแรงดึง 1200 เมกะปาสคาล จุดหลอมละลาย 225 °C และมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าร้อยละ 1.0 โดยรูปร่างของเส้นใยแสดงไว้ในรูปที่ 1 (ค)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ หินปูน และแก้วใส

สารประกอบ	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (ร้อยละ)		
	ปูนซีเมนต์ ^a	หินปูน ^b	แก้วใส ^a
Na ₂ O	0.73	0.38	15.40
MgO	1.79	1.59	1.90
Al ₂ O ₃	6.06	6.10	1.38
SiO ₂	29.61	20.70	70.72
SO ₃	3.76	0.28	0.12
K ₂ O	0.62	3.18	0.11
CaO	53.51	62.70	9.96
Fe ₂ O ₃	3.30	3.90	0.15
Others	0.62	1.17	0.26

^a ผลทดสอบโดยสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย เมื่อวันที่ 3 กรกฎาคม 2557

^b ผลทดสอบโดยภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อวันที่ 30 มิถุนายน 2558

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของหินปูนและเศษแก้วบด และรายละเอียดที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต

ขนาดของมวลรวม (มิลลิเมตร)	หน่วยน้ำหนักสภาพแห้ง (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	หน่วยน้ำหนักอิ่มตัวแห้ง (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ปริมาณที่ใช้ในส่วนผสม (อัตราส่วนโดยน้ำหนัก)
เศษแก้วบด				
1.68-4.00	2404	2400	0.20	ร้อยละ 10
หินปูน				
1.00-1.68	2493	2530	1.51	ร้อยละ 25
0.60-1.00	2489	2527	1.51	ร้อยละ 25
0.21-0.60	2460	2507	1.91	ร้อยละ 25
0.125-0.21	2375	2469	3.93	ร้อยละ 15
* c/a หมายถึง อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม				c/a [*] = 1:2.25
** w/c หมายถึง อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์				w/c ^{**} = 0.47

Specimen



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 1 (ก) หินปูน (ข) เศษแก้วบด และ (ค) เส้นใย PVA ที่ใช้ในการวิจัย

2.2 วิธีการวิจัย

ลำดับแรกศึกษาสมบัติของวัสดุและตรวจสอบชนิดของปฏิกิริยาระหว่างแอลคาไลกับหินปูน จากนั้นจึงศึกษาผลกระทบจากปฏิกิริยาแอลคาไล-ซิลิกาต่อพฤติกรรมของการขยายตัวและสมบัติทางกลของคอนกรีตผสมเส้นใยโดยใช้ส่วนผสม ขนาดคละ และการเรียงปฏิกิริยาตามคำแนะนำของ RILEM AAR-2 โดยทุกกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยส่วนผสมที่ผันแปรปริมาณเส้นใย 5 ชุด ซึ่งได้แก่ ชุดควบคุมที่ไม่ผสมเส้นใย (Control) และชุดที่ผสมเส้นใย PVA ตั้งแต่ร้อยละ 0.375 ถึง 1.00 (0.375PVA, 0.50PVA, 0.75PVA และ 1.00PVA) ทั้งนี้ได้แบ่งการศึกษออกเป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

2.2.1 การศึกษาสมบัติของวัสดุและพฤติกรรมของการขยายตัว

ศึกษาสมบัติทางเคมีของหินปูนด้วยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) และวิธี X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ตลอดจนตรวจวินิจัยแร่ประกอบหินด้วยวิธีศิลาวรรณา (Petrographic Analysis) จากนั้นจึงตรวจสอบชนิดของปฏิกิริยาระหว่างแอลคาไลกับหินปูนตามข้อกำหนดของ RILEM AAR-2 และ AAR-5 เพื่อพิสูจน์ทราบข้อเท็จจริงและเป็นข้อมูลในการกำหนดวิธีทดสอบต่อไป

ศึกษาอิทธิพลของการบ่มด้วยแท่งตัวอย่างขนาด 4.0x4.0x19.5 ซม. หรือ Micro Bar ที่เรียงปฏิกิริยาเป็นเวลา 56 วัน โดยเก็บข้อมูลและคำนวณผลตามมาตรฐาน ASTM C490 จากกลุ่มตัวอย่างที่บ่มแตกต่างกัน 2 แบบ ซึ่งได้แก่ กลุ่มที่บ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 วัน แล้วบ่มต่อด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 80°C อีก 1 วัน (2A+1H) และกลุ่มที่บ่มด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 80°C ต่อเนื่อง 3 วัน (3H) ทั้งนี้ทั้งสองกลุ่มใช้เวลาในการบ่มเท่ากันคือ 3 วัน ก่อนทำการเรียงให้เกิดปฏิกิริยาตามระยะเวลาที่กำหนด

2.2.2 การศึกษาสมบัติทางกล

การศึกษาผลกระทบต่อสมบัติทางกลของคอนกรีตผสมเส้นใย PVA (บ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 วัน แล้วบ่มต่อด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 80°C อีก 1 วัน) พิจารณาจากผลทดสอบกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสความยืดหยุ่นของกลุ่มตัวอย่างที่เกิดและไม่เกิดปฏิกิริยา ASR ซึ่งได้แก่ กลุ่มที่เรียงปฏิกิริยา 28 วัน (28d) และกลุ่มที่ไม่เรียงปฏิกิริยา (non-ASR) โดยศึกษาด้วยตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 5.0x5.0x5.0 ซม. และทำการทดสอบสมบัติทางกลเมื่ออายุ 35, 42, 49 และ 56 วัน ตามลำดับ

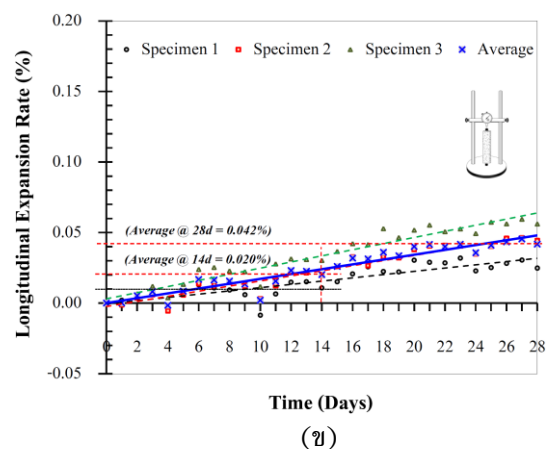
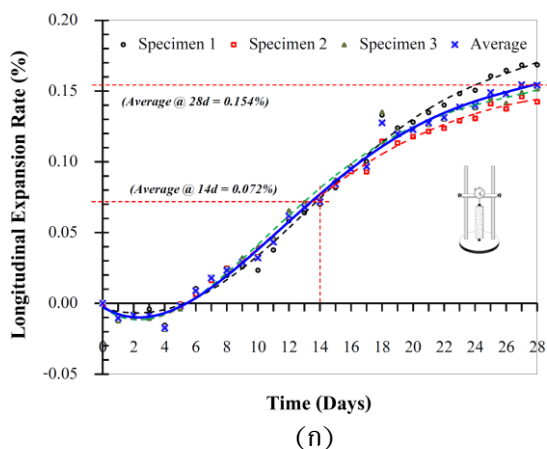
นอกจากนี้ยังได้ศึกษารายละเอียดระดับจุลภาคของ Micro Bar ที่ไม่เรียงและเรียงให้เกิดปฏิกิริยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับวินิจัยและแปลผลการศึกษา

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

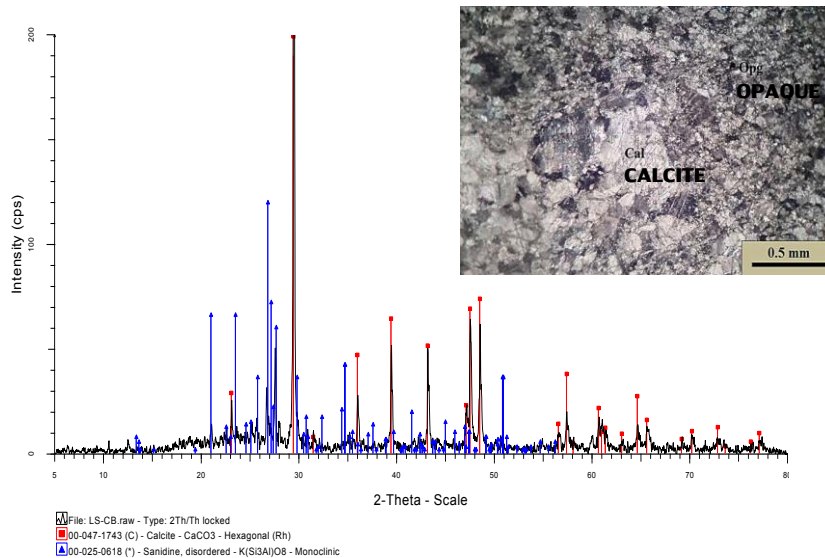
3.1 การศึกษาสมบัติของหินปูนและการตรวจสอบชนิดของปฏิกิริยาระหว่างแอลคาไลกับหินปูน

จากการตรวจวินิจฉัยแร่ประกอบหินด้วยวิธีสีลาบรรณพบว่า หินปูนที่ใช้ในการศึกษานี้และการศึกษาก่อนหน้า [5] ประกอบด้วยแร่แคลไซต์ประมาณร้อยละ 99 และพบแร่อื่นๆ รวมถึงควอตซ์ปะปนอยู่ประมาณร้อยละ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยผลวิเคราะห์สีลาบรรณสอดคล้องกับผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี XRF (ตารางที่ 1) ซึ่งพบว่า หินปูนมี CaO และ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักโดยมีปริมาณร้อยละ 62.70 และ 20.70 ตามลำดับ รวมถึงมี Al_2O_3 และ MgO ร้อยละ 6.10 และ 1.59 ด้วย

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหินปูนด้วยวิธี XRD ในรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่า ซิลิเกตที่พบในหินคือ Sanidine $\text{K}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$ ซึ่งเป็นแร่ในกลุ่มเฟลสปาร์ [6] และมีโครงสร้างผลึกแบบไม่สมมาตร ด้วยเหตุนี้หินปูนที่ใช้ในการศึกษาจึงมีโอกาสดังเกิดปฏิกิริยา ASR ได้ ขณะที่คาร์บอเนตที่พบในหินปูนคือ Calcite (CaCO_3) มีโมเลกุลแบบ Hexagonal-Rh และมีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน CaO/MgO กับปริมาณ Al_2O_3 (ตามข้อแนะนำของ CSA A23.2-26A) อยู่ในเกณฑ์ที่อาจเกิดปฏิกิริยา แอลคาไล-คาร์บอเนต (Alkali-Carbonate Reaction, ACR) ได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลการขยายตัวของ Micro Bar ที่ใช้หินปูนต่างขนาดตามวิธี RILEM AAR-2 (ขนาดคละตั้งแต่ 0.125-4.00 มม.) และ AAR-5 (ขนาดคละตั้งแต่ 4.00-8.00 มม.) พบว่า การขยายตัว ณ วันที่ 14 และ 28 ของการเร่งปฏิกิริยา แท่งตัวอย่างที่ทดสอบด้วยวิธี AAR-2 มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 0.072 และ 0.154 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) ขณะที่แท่งตัวอย่างที่ทดสอบด้วยวิธี AAR-5 มีการขยายตัวเฉลี่ยร้อยละ 0.020 และ 0.042 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) ทั้งนี้จากพฤติกรรมและผลการขยายตัวสรุปได้ว่า หินปูนที่ใช้ในการศึกษานี้มีแนวโน้มเกิดปฏิกิริยา ASR มากกว่า ACR เนื่องจากการขยายตัวไม่เพิ่มขึ้นตามขนาดของมวลรวม อย่างไรก็ตาม หินปูนดังกล่าวมีโอกาสดังเกิดปฏิกิริยากับแอลคาไลได้เช่นกัน (และอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพของหินปูน) เนื่องจากวันที่ 14 ของการเร่งปฏิกิริยา แท่งตัวอย่างที่ทดสอบด้วยวิธี AAR-5 มีการขยายตัวมากกว่าร้อยละ 0.01 หรือมีค่าอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.10 ซึ่งเป็นช่วงที่อาจเกิดปฏิกิริยาระหว่างแอลคาไลกับมวลรวมประเภทคาร์บอเนตได้ ทั้งนี้วิเคราะห์จากข้อแนะนำของ RILEM AAR-5 และ Chinese accelerated concrete microbar method



รูปที่ 2 พฤติกรรมการขยายตัวของ Micro Bar ที่ทดสอบด้วยวิธี RILEM (ก) AAR-2 และ (ข) AAR-5

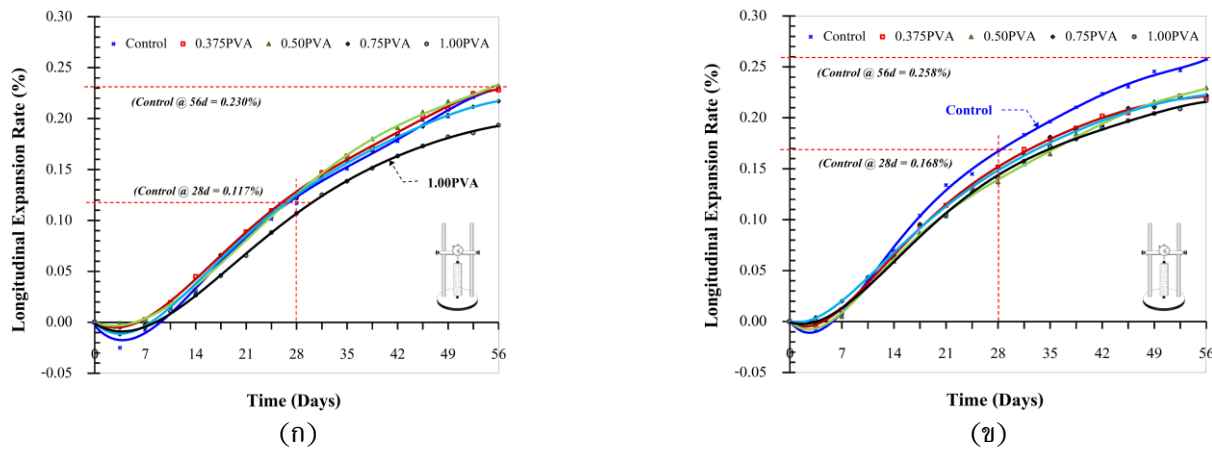


รูปที่ 3 ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีด้วยวิธี XRD และภาพถ่าย Thin Section ของหินปูน

3.2 การศึกษาพฤติกรรมของการขยายตัวจากผลกระทบของการบ่มและปริมาณเส้นใย

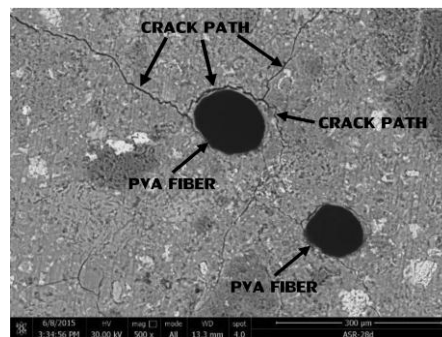
จากพฤติกรรมของการขยายตัวของกลุ่มตัวอย่าง 2A+1H ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) พบว่า ส่วนผสมที่มีเส้นใยร้อยละ 1.00 (1.00PVA) มีการขยายตัวต่ำกว่าชุดควบคุมที่ไม่ผสมเส้นใย (Control) อย่างเห็นได้ชัดและมีแนวโน้มดีขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยวันที่ 28 และ 56 ของการเร่งปฏิกิริยา การขยายตัวลดลงกว่าร้อยละ 8 และ 16 ตามลำดับ ขณะที่ส่วนผสมอื่นๆ มีการขยายตัวใกล้เคียงกับชุดควบคุมยกเว้นส่วนผสมที่มีเส้นใยร้อยละ 0.75 (0.75PVA) ที่การขยายตัวมีแนวโน้มต่ำกว่าชุดควบคุมในช่วงท้ายหรือเมื่อการขยายตัวมีค่ามากกว่าร้อยละ 0.20 ซึ่งต่างจากการใช้เส้นใยเหล็กขนาดเล็กในงานวิจัยอื่น [7-8] ที่การขยายตัวแปรผันตามปริมาณเส้นใยอย่างชัดเจน ทั้งนี้หากเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการควบคุมการขยายตัวระหว่างเส้นใย PVA กับเส้นใยเหล็กขนาดเล็กในงานวิจัยอื่น [7] จะเห็นว่า วันที่ 28 ของการเร่งปฏิกิริยา เส้นใยเหล็กขนาดเล็กสามารถลดการขยายตัวได้กว่าร้อยละ 20 หรือมากกว่าการใช้เส้นใย PVA 2.5 เท่า แต่อย่างไรก็ดีหากพิจารณาที่ระดับการขยายตัวเดียวกัน หรือเมื่อชุดควบคุมมีการขยายตัวร้อยละ 0.20 จะเห็นว่า เส้นใยทั้งสองชนิดสามารถลดการขยายตัวได้ใกล้เคียงกันคือประมาณร้อยละ 15 ดังนั้นการใช้เส้นใย PVA ในสัดส่วนร้อยละ 1.00 จึงมีประสิทธิภาพเทียบเคียงกับการใช้เส้นใยเหล็กขนาดเล็ก และเพียงพอสำหรับกรณีที่มีการขยายตัวมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 0.30 หรือในระดับที่ปัญหายังไม่รุนแรงมากซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการชะลอปัญหาการเสื่อมสภาพ

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของการขยายตัวของกลุ่มตัวอย่าง 3H ซึ่งบ่มด้วยน้ำอุณหภูมิ 80 °C ต่อเนื่อง 3 วัน พบว่า ส่วนผสมที่มีเส้นใยขยายตัวต่ำกว่าชุดควบคุมและมีแนวโน้มดีขึ้นตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) โดยกลุ่มตัวอย่างที่มีเส้นใยร้อยละ 1.00 ลดการขยายตัวลงมากที่สุดคือร้อยละ 16 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ณ วันที่ 28 และ 56 ของการเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้หากพิจารณาผลกระทบจากรูปแบบการบ่มต่อพฤติกรรมของการขยายตัวจะเห็นว่า ในวันที่ 28 และ 56 ของการเร่งปฏิกิริยา ชุดควบคุมของกลุ่มตัวอย่าง 3H มีการขยายตัวมากกว่าชุดควบคุมของกลุ่มตัวอย่าง 2A+1H ร้อยละ 44 และ 12 ตามลำดับ โดยการขยายตัวส่วนใหญ่ (>ร้อยละ 60) เกิดขึ้นในช่วง 28 วันแรก ทั้งนี้คาดว่า การบ่มด้วยน้ำที่อุณหภูมิสูงต่อเนื่องในช่วงอายุน้อยก่อนเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลเสียต่อการพัฒนาโครงสร้างระดับจุลภาค ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าเงื่อนไขในการบ่มคอนกรีตเป็นปัจจัยสนับสนุนที่มีอิทธิพลต่อการลด หรือเพิ่มผลกระทบจากปัญหาแอลคาไล-ซิลิกา รวมถึงอาจมีส่วนในการส่งเสริมประสิทธิภาพของเส้นใย PVA ด้วย



รูปที่ 4 พฤติกรรมการขยายตัวของ Micro Bar กลุ่มตัวอย่าง (ก) 2A+1H และ (ข) 3H

จากการศึกษารายละเอียดระดับจุลภาคของกลุ่มตัวอย่าง 3H ที่อายุ 56 วัน พบว่า เส้นใย PVA ทำให้รอยแตกกว้างในเพสต์เกิดการแตกแขนงและมีขนาดเล็กลงดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งบทบาทดังกล่าวช่วยลดผลกระทบที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตได้ ด้วยเหตุนี้จึงช่วยยืดเวลาในการเสื่อมสภาพและลดการขยายตัวให้น้อยลง ดังนั้นส่วนผสมที่มีเส้นใยปริมาณสูงจึงมีโอกาสดการขยายตัวลงได้มากกว่าส่วนผสมที่มีเส้นใยปริมาณต่ำ แต่อย่างไรก็ดีหากเพิ่มปริมาณเส้นใยโดยไม่คำนึงถึงขีดจำกัดด้านปริมาณอาจส่งผลเสียต่อการทำงาน (workability) และสมบัติทางกลด้านอื่นๆ ได้



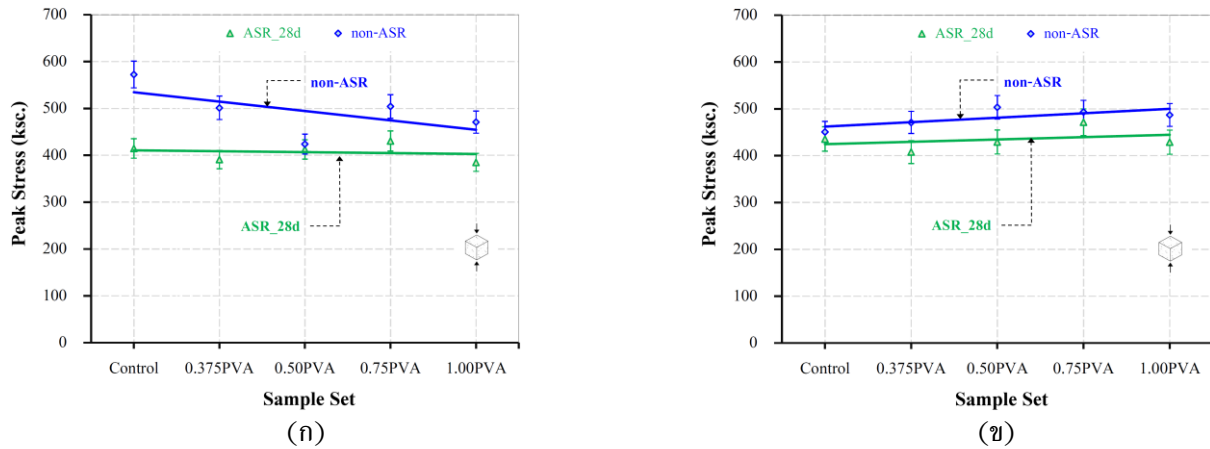
รูปที่ 5 ลักษณะของรอยแตกกว้างใน Paste บริเวณเส้นใย (ถ่ายจากกลุ่มตัวอย่าง 3H ที่อายุ 56 วัน)

3.3 การศึกษาสมบัติทางกล

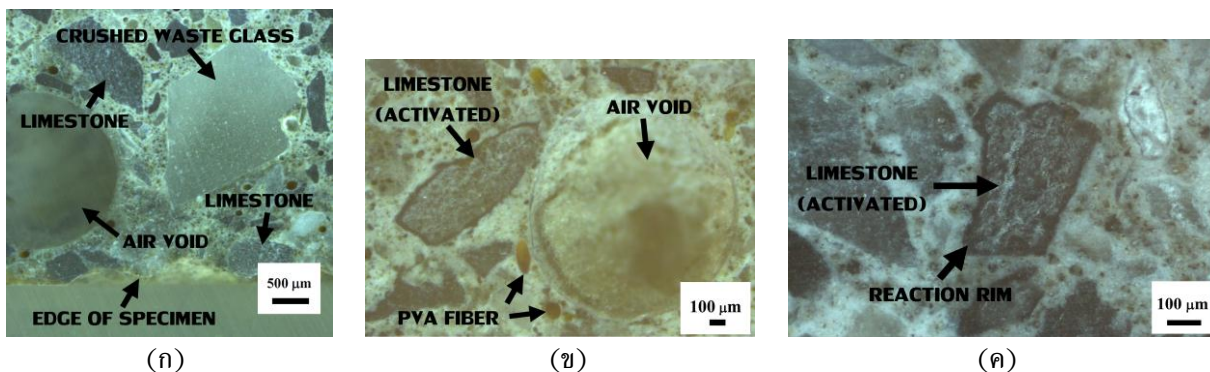
3.3.1 กำลังรับแรงอัด

จากผลทดสอบในรูปที่ 6 (ก-ข) และตารางที่ 3 พบว่า กำลังรับแรงอัดในช่วงอายุเดียวกันของทุกส่วนผสมในแต่ละกลุ่มตัวอย่างมีค่าต่างกันเล็กน้อย และไม่พบความสัมพันธ์ที่แน่ชัดระหว่างปริมาณเส้นใยกับสมบัตินี้ ทั้งนี้คาดว่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยได้แก่ การควบคุมคุณภาพในการทำงาน การพัฒนาโครงสร้างระดับจุลภาค สมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ การกระจายตัว และทิศทางการวางตัวของเส้นใย โดยเมื่อเกิดปัญหา ASR กำลังรับแรงอัดจะลดลงตามความรุนแรงของปัญหา ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบระหว่างกลุ่มพบว่า ที่อายุ 35, 42, 49 และ 56 วัน กลุ่มตัวอย่างที่เร่งปฏิกิริยา 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ไม่เร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3-28, 17-27, 3-15 และ 4-15 ตามลำดับ โดยวันที่ 35 และ 42 กำลังรับแรงอัดลดลงมากกว่าวันที่ 49 และ 56 ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลมาจากการพัฒนาโครงสร้างระดับจุลภาค และจากการสังเกตลักษณะภายนอกของตัวอย่างคอนกรีตที่เกิดปฏิกิริยาด้วยตาเปล่าไม่พบสัญญาณการเสื่อมสภาพ หรือความผิดปกติใดๆ แต่อย่างไรก็ดีเมื่อตรวจสอบรายละเอียดระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (ศึกษาจากชิ้นงานของ Micro Bar) กลับพบการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของหินปูนอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะบริเวณขอบที่มีสีเข้มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7 (ข-ค) ทั้งนี้คาดว่าเป็นผล

มาจากปฏิกิริยาระหว่างแอลคาไลกับหินปูนตามที่ได้กล่าวไว้ในข้อ (3.1) โดยกลไกการเปลี่ยนแปลงสภาพของหินปูน หรือมวลรวมที่มีแร่ประกอบหินในกลุ่มคาร์บอเนตสามารถศึกษาได้จากงานวิจัยอื่น [9]



รูปที่ 6 แนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทรงลูกบาศก์ที่อายุ (ก) 35 วัน และ (ข) 49 วัน

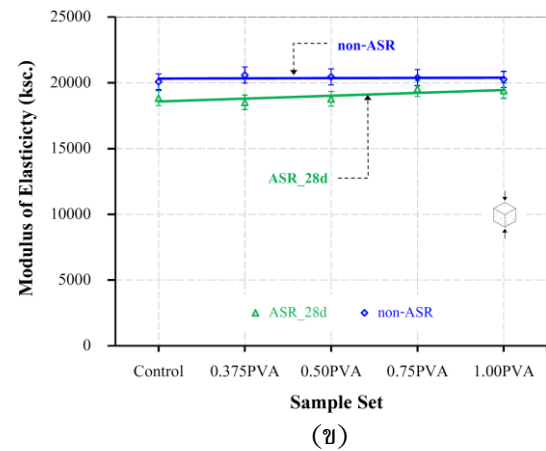
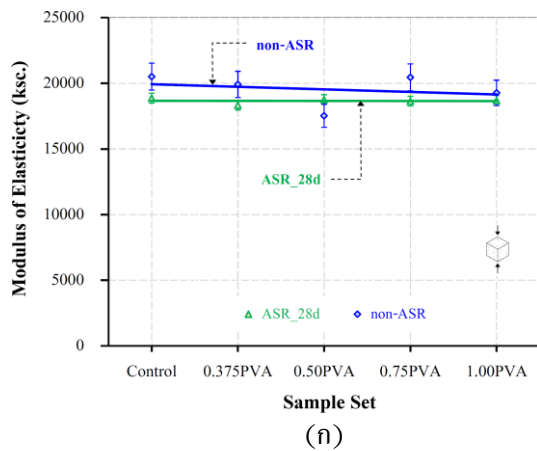


รูปที่ 7 รายละเอียดระดับจุลภาคของ Micro Bar (ก) ที่ไม่เร่งปฏิกิริยา (ข) เร่งปฏิกิริยา 28 วัน และ (ค) 56 วัน

3.3.2 โมดูลัสความยืดหยุ่น

จากผลทดสอบในรูปที่ 8 (ก-ข) พบว่า แนวโน้มของค่า E ส่วนใหญ่มีลักษณะคล้ายกับการศึกษากำลังรับแรงอัด ยกเว้นผลกระทบจากปฏิกิริยา ASR ที่ส่งผลต่อค่า E ในระดับที่ต่ำกว่า โดยพฤติกรรมดังกล่าวตรงข้ามกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [10] ที่ใช้แท่งตัวอย่างขนาดใหญ่และหิน Rhyolite ในการศึกษา ทั้งนี้คาดว่าป็นผลมาจากขนาดของแท่งตัวอย่าง การเกิดและสะสมตัวของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ บริเวณ ITZ ของเส้นใย PVA ในขั้นตอนการเร่งปฏิกิริยา และการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของหินปูนดังแสดงในรูปที่ 7 (ข-ค)

เมื่อพิจารณาผลทดสอบระหว่างกลุ่มในตารางที่ 3 พบว่า ที่อายุ 35, 42, 49 และ 56 วัน กลุ่มตัวอย่างที่เร่งปฏิกิริยามีค่า E ต่ำกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ไม่เร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3-9, 7-10, 4-10 และ 5-10 ตามลำดับ ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อคอนกรีตผสมเส้นใย PVA เกิดปัญหา ASR พร้อมกับมวลรวมแสดงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงสภาพจะส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดมากกว่าค่า E



รูปที่ 8 แนวโน้มของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของตัวอย่างทรงลูกบาศก์ (ก) ที่อายุ 35 วัน และ (ข) 49 วัน

ตารางที่ 3 กำลังรับแรงอัดและค่า E ของตัวอย่างทรงลูกบาศก์ และการเปรียบเทียบผลทดสอบกับกลุ่ม non-ASR

อายุที่ทดสอบ และ ชุดตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)		เปรียบเทียบ กับ non-ASR (ร้อยละ)	โมดูลัสความยืดหยุ่น (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)		เปรียบเทียบกับ non-ASR (ร้อยละ)
	non-ASR	28d		non-ASR	28d	
35 & (42) วัน						
Control	572 (533)	415 (441)	-28 (-17)	20513 (21013)	18863 (18978)	-8 (-10)
0.375PVA	501 (525)	391 (432)	-22 (-18)	19916 (20254)	18333 (18773)	-8 (-8)
0.50PVA	424 (500)	413 (404)	-3 (-19)	17524 (20355)	18754 (18874)	+7 (-7)
0.75PVA	504 (545)	431 (417)	-15 (-23)	20453 (20740)	18633 (19027)	-9 (-7)
1.00PVA	471 (524)	385 (385)	-18 (-27)	19268 (20390)	18687 (18805)	-3 (-8)
49 & (56) วัน						
Control	451 (558)	436 (488)	-3 (-13)	20076 (20809)	18826 (19544)	-6 (-6)
0.375PVA	471 (493)	408 (472)	-13 (-4)	20592 (21037)	18515 (18932)	-10 (-10)
0.50PVA	503 (526)	429 (449)	-15 (-15)	20449 (20609)	18781 (18777)	-8 (-9)
0.75PVA	493 (518)	471 (480)	-4 (-7)	20394 (20130)	19541 (19192)	-4 (-5)
1.00PVA	487 (486)	429 (488)	-12 (+0.2)	20259 (19373)	19402 (19582)	-4 (+1)

4. สรุป

เส้นใย PVA ปริมาณร้อยละ 0.75-1.00 มีผลต่อการบรรเทาปัญหา ASR ในคอนกรีตแต่ไม่สามารถยับยั้ง หรือจำกัดการขยายตัวให้หยุดลงได้ โดยคุณภาพในการบ่มและการกระจายตัวของเส้นใยเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลสำหรับพฤติกรรมนี้ และเส้นใย PVA ไม่ช่วยให้กำลังรับแรงอัดและค่า E ดีขึ้น ดังนั้นการเสริมประสิทธิภาพของคอนกรีตด้วยเส้นใย PVA จึงเป็นเพียงการยืดเวลาในการเสื่อมสภาพ และหากต้องการผลสัมฤทธิ์ที่รอบด้านควรใช้เส้นใย PVA ร่วมกับวิธีการอื่นซึ่งรายละเอียดของบทสรุปแต่ละประเด็นมีดังนี้

เส้นใย PVA ปริมาณร้อยละ 1.00 มีนัยสำคัญต่อการควบคุมการขยายตัวที่เกิดจากปัญหา ASR ขณะที่ปริมาณร้อยละ 0.75 มีแนวโน้มส่งผลต่อการควบคุมปัญหาในระยะยาว และปริมาณที่ต่ำกว่าร้อยละ 0.50 ไม่มีผลต่อการควบคุมปัญหานี้

การบ่มคอนกรีต หรือการพัฒนาโครงสร้างระดับจุลภาคเป็นปัจจัยสนับสนุนที่มีอิทธิพลต่อการขยายตัว รวมถึงมีส่วนในการส่งเสริมประสิทธิภาพของเส้นใย PVA ในการควบคุมปัญหา ASR โดยประสิทธิภาพในการควบคุมการขยายตัวและลดผลกระทบจากปัญหา ASR มีแนวโน้มแปรผันตามคุณภาพของการบ่มคอนกรีต

คอนกรีตผสมเส้นใย PVA ที่ประสบปัญหา ASR และเกิดผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพของมวลรวมในคราวเดียวกันจะส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดมากกว่าค่า E และไม่พบความสัมพันธ์ที่แน่ชัดระหว่างปริมาณเส้นใยกับสมบัติทางกลเหล่านี้

การใช้เส้นใย PVA มีอิทธิพลต่อขนาดและพฤติกรรมของรอยแตกร้าวใน Cement Paste โดยประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับปริมาณและการกระจายตัวของเส้นใยเป็นสำคัญ ในการใช้งานจริงต้องคำนึงถึงขีดจำกัดด้านปริมาณประกอบด้วยเสมอ ทั้งนี้เพื่อลดผลกระทบต่อการทำงาน (workability) และต่อสมบัติทางกลด้านอื่นๆ ของคอนกรีต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ ที่สนับสนุนทุนวิจัยบางส่วน สถานที่ปฏิบัติงาน และเครื่องมือทดสอบ ตลอดจนขอขอบคุณศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์การทดสอบสมบัติทางกล และบริษัท สยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์การศึกษารายละเอียดระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Swamy, R. N. & Al-Asali, M. M. (1988). Expansion of concrete due to alkali-silica reaction. ACI Materials Journal 85-M5, 33-40.
- [2] Sujjavanich S., Suwanvitaya P. and Rothstein D. Investigation of ASR in mass concrete structures : a case study. The Sixth International Structural Engineering and Construction Conference, Zurich, 2011.
- [3] Sujjavanich S., Wongkamjan W. Won-in K. Sarikabhuti M. and Guntapong R. Investigation of potential alkali-silica reactivity of aggregates sources in the eastern part of Thailand. The 8th National Concrete Conference, Pattaya, 2012. (In Thai)
- [4] Sujjavanich S., Sangsuwan C. Won-in K. Guntapong R. and Kubtitunhi B. Efficiency of lignite fly ash on expansion control of alkali aggregate reaction. Proceedings of the 5th International Conference of Asian Concrete Federation, Chonburi, 2012, ACF 2012-0194.
- [5] Tussakorn W. and Sujjavanich S. Expansion of mortar bar using some limestone type and crushed waste glass. The 19th National Convention on Civil Engineering, Khon Kaen, 2014. (In Thai)
- [6] Department of Mineral Resources. Minerals, 5th edn. , Prachachon, Bangkok, 2009. (In Thai)
- [7] Bektas, F., Turanli, L. & Ostertag, C. P. (2006). New approach in mitigating damage caused by alkali-silica reaction. Journal of Materials and Science 41, 5760-5763.
- [8] Turanli, L., Shomglin, K. Ostertag, C. P. & Monteiro, P. J. M. (2001). Reduction in alkali-silica expansion due to steel microfibers. Cement and Concrete Research 31, 825-827.
- [9] Tang M., Liu Z. and Han S. Mechanism of alkali-carbonate reaction. Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions, New Jersey, 1987, 275-279
- [10] Thaipum S. Properties and Effects of Reinforced Steel on Expansion of ASR-Affected Concrete. MS thesis, Kasetsart University, Bangkok, 2013. (In Thai)