

# การใช้ประโยชน์ของเถ้าลอยและดินขาวในการควบคุมการขยายตัวของมอร์ตาร์ เนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา Utilization of Fly Ash and Meta Kaolin Controlling Expansion of Mortar due to Alkali Silica Reaction

จักรพันธ์ แสงสุวรรณ<sup>1\*</sup>, อนุรักษ์ เทพภรณ์<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล <sup>1\*</sup>Chak\_sn@hotmail.com

<sup>2</sup>anuruk\_note@hotmail.com,

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุปอซโซลานของ เถ้าลอย (FA) และดินขาว (MK) ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ โดยคงที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) = 0.47 และผันแปรการแทนที่ของเถ้าลอยร้อยละ 10, 20 และ 30 และดินขาวร้อยละ 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ใช้สารประเภทลดน้ำ (HRWR) ชนิด F และใช้หินปูนเป็นส่วนผสมของมอร์ตาร์และคอนกรีต โดยทดสอบการขยายตัวของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C1260 และ 1567 ทดสอบกำลังรับแรงอัดขนาด 5x5x5 เซนติเมตร แช่ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ 80°C ที่อายุ 3 7 14 และ 28 วัน และทดสอบหาร้อยละช่องว่างในมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C642

ผลการทดสอบพบว่า มอร์ตาร์ควบคุมขยายตัวมากที่สุดร้อยละ 0.195 และขยายตัวน้อยที่สุด คือส่วนผสม MK20 FA30 และ FA20 มีค่าร้อยละ 0.037, 0.047 และ 0.101 ตามลำดับ ที่อายุ 14 วัน กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่แช่ในน้ำที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 432 กก/ซม<sup>2</sup> มากกว่าแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ MK10, MK15 และ FA10 ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 423, 415 และ 312 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ และจากผลการทดสอบร้อยละของช่องว่างในมอร์ตาร์ พบว่า มอร์ตาร์ควบคุมมีร้อยละของช่องว่างต่ำที่สุดมีค่าร้อยละ 15.003 และมากที่สุดเรียงตามลำดับคือ MK20, MK10, MK15, FA20 และ FA10 มีค่าร้อยละ 16.79, 16.021, 15.808, 15.721 และ 15.664 ตามลำดับ โดยปริมาตรของช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ของมอร์ตาร์มีค่าสูงส่งผลให้การขยายตัวของมอร์ตาร์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการใช้วัสดุปอซโซลานของเถ้าลอย และดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกซึ่งช่วยปรับปรุงคุณภาพของมอร์ตาร์และคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพด้านกำลังอัดเพิ่มมากขึ้น และควบคุมการขยายตัวของมอร์ตาร์และคอนกรีต

**คำสำคัญ :** ปอซโซลาน, อัลคาไลซิลิกา, การขยายตัว, มอร์ตาร์, กำลังรับแรงอัด

## Abstract

This research the efficiency of pozzolanic materials of fly ash (FA) and Meta kaolin (MK) as replacement by cement. constant water to binder ratio (w/b) = 0.47 and variable replace of fly ash 10%, 20% and 30% and Meta kaolin 10%, 15% and 20% by weight, water reducing agent (HRWR) type F was used and using limestone as a mixture of mortar bars and concrete The mortar bars expansion test was carried out in accordance with ASTM C1260 and 1567, the compressive strength was tested, size 5x5x5 cm, immersed in sodium hydroxide, temperature 80°C at 3, 7, 14 and 28 days of age, and tested for voids percentage in mortar bars according to ASTM C642

The test results showed that control mortar with the largest expansion of 0.195 percent and the least expansion was the mixture of MK20, FA30 and FA20, with values of 0.037, 0.047 and 0.101, respectively, at 14 days of age and compressive strength of the mixture immersed in water at 3, 7, 14 and 28 days gave the compressive strength of 432 kg/cm<sup>2</sup> more than the immersion in the sodium hydroxide solution of MK10, MK15 and FA10 giving the compressive strength were 423, 415 and 312 kg/cm<sup>2</sup> at 28 days of age, respectively. From the volume of permeability percentage voids in concrete and mortar test, it was found that The control mortars had the lowest percentage of voids at 15.003 percent and the highest respectively were MK20, MK10, MK15, FA20 and FA10 at 16.79%, 16.021, 15.808, 15.721 and 15.664, respectively. The amount of water permeable voids of mortar is high result in the expansion of the mortar bars. Therefore, the use of pozzolanic materials of fly ash and Meta kaolin replace of cement produces a pozzolanic reaction which improves the quality of the mortar bars and concrete for increased compressive strength and control expansion of mortar and Concrete.

**Keywords :** pozzolan, alkali silica, expansions, compressive strength

## 1. บทนำ (Introduction)

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในโลก มีเหตุผลหลายประการที่ในการเลือกใช้คอนกรีตเป็นอันดับแรกมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง เช่น มีความทนทาน ต้นทุนต่ำ การบำรุงรักษาต่ำ และความต้านทานไฟสูง อย่างไรก็ตาม การสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่รุนแรงเป็นเวลานานอาจทำให้คอนกรีตเสื่อมสภาพได้ อายุการใช้งานของคอนกรีตจะลดลง มีหลายปัจจัย เช่น เหล็กเสริมเกิดสนิมและเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา(ASR) การเกิดคาร์บอนไดออกไซด์และการชะล้าง กลไกความเสียหายจากการเกิดปฏิกิริยา ASR ในคอนกรีต เป็นปัญหาที่รุนแรงเกี่ยวข้องกับความทนทานซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายอย่างมากต่อโครงสร้างคอนกรีตงานซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตที่ได้รับผลกระทบจาก ASR นั้น จะซับซ้อนมากมีค่าใช้จ่ายสูง ในปี ค.ศ. 1940 Stanton [1] ชี้ให้เห็นว่าคอนกรีตสามารถเสียหายได้จากการขยายตัวเนื่องจากการใช้มวลรวมที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาและสังเกตว่าประสิทธิผลของการใช้วัสดุปอซโซลานโดยทดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะช่วยลดปฏิกิริยา ASR [2] ตั้งแต่นั้นมานักวิจัยได้รายงานเกี่ยวกับการขยายตัวเนื่องจาก ASR ในคอนกรีตโครงสร้างในส่วนต่าง ๆ ของโลก ในปี 1980 เนื่องจากการขยายตัวที่เป็นอันตรายซึ่งพิสูจน์ให้เห็นถึงความซับซ้อนของกลไกการเกิดปฏิกิริยา ASR มีหลายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกลไกนี้อย่างมาก ซิลิกาที่มีอยู่เป็นรูปแบบอสัณฐานในมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยา เช่น opaline silica, chalcedony, cristobalite, tridymite, volcanic glasses, crypto crystalline quartz, strained quartz เป็นต้น และ

สารละลายในช่องว่างของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีอัลคาไลสูง ปฏิกิริยาของ amorphous silica ของมวลรวม กับอัลคาไล ในสารละลายในช่องว่างทำให้เกิดเป็นเจลสามารถทำให้เกิดการขยายตัวและแตกร้าวในคอนกรีต [3] ดังนั้นปริมาณอัลคาไลของซีเมนต์จึงมีบทบาทสำคัญในการขยายตัวเนื่องจาก ASR มีข้อสังเกตว่าความเข้มข้นของอัลคาไลในปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้น สามารถให้ผลการขยายตัวสูงขึ้นเนื่องจาก ASR [4] การใช้ซีเมนต์ที่มีอัลคาไลต่ำ ได้รับการแนะนำโดยมาตรฐานต่างๆเพื่อลด ASR อย่างไรก็ตาม ปูนซีเมนต์มีปริมาณอัลคาไลต่ำกว่า 0.6% ไม่สามารถลดการขยายตัวต่ำกว่าค่าจำกัดได้ นี้มักจะเป็นเพราะการมีส่วนร่วมของอัลคาไลโดยมวลรวม

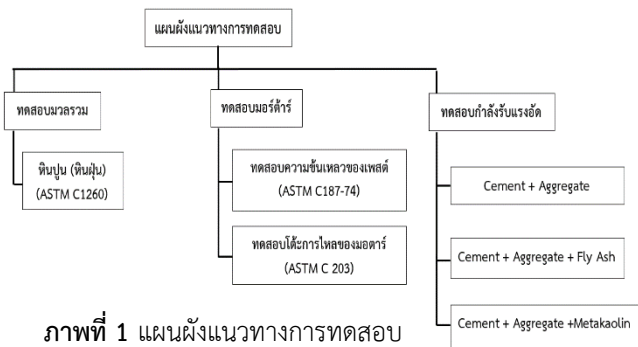
เถ้าลอย (FA) เป็นวัสดุเสริมซีเมนต์ที่ได้รับการยอมรับอย่างดีใช้ในการผลิตคอนกรีตในส่วนต่างๆ ของโลก การใช้ FA แทนซีเมนต์บางส่วนสามารถผลิตคอนกรีตที่มีความแข็งแรงสูงและความทนทานที่ดีขึ้น [5] Oner และคณะ [6] ได้ตรวจสอบปริมาณที่เหมาะสมของ FA ในคอนกรีต และแนะนำว่าสามารถแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA ได้ถึงร้อยละ 40 คอนกรีตที่ผสมรวมกับ FA แสดงให้เห็นประสิทธิภาพสูงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก ได้จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ผลิตจากซีเมนต์ไฮดรตทำปฏิกิริยากับซิลิกาอสัณฐานที่มีอยู่ใน FA และเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดเกาะที่ดี [7] การใช้ FA ในคอนกรีตยังได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางเป็นมาตรการบรรเทา ASR ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ดังนั้นในบทความนี้จึงทบทวนความก้าวหน้าของการทดสอบล่าสุดกับความรู้เกี่ยวกับกลไกของปฏิกิริยา ASR และการมีส่วนร่วมประกอบต่างๆของส่วนผสม

ของคอนกรีต ในการขยายตัวที่เป็นอันตรายนี้ การใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในคอนกรีตเป็นเทคนิคการลด ASR ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลาย

มีรายงานลักษณะปอซโซลานิกของ Metakaolin เมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน Metakaolin สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อสร้าง C-S-H ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับองค์ประกอบและโครงสร้างที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน [8] การวิจัยพบว่าสำหรับ meta kaolin ที่ผลิตมาจากดินได้สร้างผลิตภัณฑ์ C-S-H ที่เกิดขึ้นมีอัตราส่วน Ca : Si ต่ำ (ในช่วง 0.8 ถึง 1.5) ซึ่งช่วยในการดักจับไอออนของอัลคาไลจากสารละลายรูพูน การลดความเป็นด่าง และค่า pH ในสารละลายในช่องว่างและการเกิดปฏิกิริยาของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นผลดีที่สุดของปอซโซลานในการลดการขยายตัวอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา (ASR) ในคอนกรีต[9]

## 2. วิธีการวิจัย (Methodology)

### 2.1 แผนผังแนวทางการทดสอบ



ภาพที่ 1 แผนผังแนวทางการทดสอบ

### 2.2 รายละเอียดวัสดุและการทดสอบ

สำหรับรายละเอียดของวัสดุที่นำมาใช้ในการศึกษา มีดังต่อไปนี้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150
2. มวลรวมที่ใช้ หินปูน จากภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นหินที่ใช้ งานก่อสร้างจริงเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลน์ซิลิกาได้ ซึ่งมีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและมีคุณสมบัติจากหินปูนที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C127 ดังตารางที่ 1
3. เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นเถ้าลอยจาก อำเภอบางบาล จังหวัดลพบุรี สามารถลดปฏิกิริยาแอลคาไลน์ซิลิกาได้และนำมาทดสอบประสิทธิภาพการแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก
4. ดินขาว (Meta Kaplin) นำเข้าจากบริษัท Metamax

CO.,LTD, from USA มีลักษณะเป็นผลึก ใช้เป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์

5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แบบผลึก ใช้ 40.0 กรัม ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายในน้ำกลั่น 900 มล.
6. น้ำกลั่นใช้ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
7. สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำ (Supperplastizizer Type FF, HRWR) ตามข้อกำหนด C494/C494M Type F สำหรับส่วนผสมที่มีดินขาว
8. น้ำมันทาแบบหล่อและน้ำกลั่น

2.2.1 ทดสอบหาความไวต่อปฏิกิริยาของหินปูนตามมาตรฐาน ASTM C1260 [10] มีส่วนผสมดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมการแทนที่ของหินปูนด้วยหินแกรนิตตามมาตรฐาน ASTM C1260

Mixed Proportion	Material (Rock)	proportion (%)	Cement (g)	Water (g)	Inert Aggregate (g)	reactive aggregate (g)
GN/LS0	Granite/limestone	100/0	440	206.8	990	0
GN / LS25	Granite/limestone	75/25	440	206.8	743	247
GN / LS50	Granite/limestone	50/50	440	206.8	495	495
GN/LS75	Granite/limestone	25/75	440	206.8	247	743
GN/LS100	Granite/limestone	0/100	440	206.8	0	990

2.2.2 ทดสอบแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยา ASR ในมอร์ตาร์ด้วยวิธีการเร่งตามมาตรฐาน ASTM C 1260 และ ASTM 1567 [11] ซึ่งได้กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) = 0.47 โดยรายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C1260 และ ASTM C1567

Mixes	Material	PFA (%)	MK (%)	Fine 40% + coarse 60% (g)	Water (mL)	Cement (g)	Na <sub>2</sub> O equivalent of 1.5% by mass of cement
Control	-	-	-	1700	220	440	12.94
C / FA10	FA	10	0	1700	220	400	12.58
C / FA20	FA	20	0	1700	220	352	14.07
C / FA30	FA	30	0	1700	220	308	14.55
C / MK10	MK	0	10	1700	220	400	12.88
C / MK15	MK	0	15	1700	220	352	12.85
C / MK20	MK	0	20	1700	220	308	12.85

### 2.2.3 ทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์

การทดสอบปฏิกิริยาปอซโซลานิกของวัสดุปอซโซลานใช้ทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 และ ดินขาวร้อยละ 10, 15 และ 20 ตามลำดับ

2.2.4 ทดสอบหาปริมาณร้อยละช่องว่างที่ซึมผ่านได้ของมอร์ตาร์และคอนกรีตในสภาพแข็ง ตามมาตรฐาน ASTM C642-97 เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเปลี่ยนแปลงระหว่างหินและปริมาณของช่องว่างในมอร์ตาร์และคอนกรีต

### 3. ผลการวิจัย (Results)

ผลของงานวิจัยนี้ใช้วัสดุหินปูนที่ไวต่อปฏิกิริยา SAR และทดสอบถึงผลกระทบเมื่อใช้วัสดุปอซโซลานของถ้ำลอยและดินขาวในส่วนผสมของมอร์ตาร์และตรวจสอบประสิทธิภาพของหินปูนดังตารางที่ 3 ทดสอบแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยา ASR ในมอร์ตาร์ด้วยวิธีการเร่งตามมาตรฐาน ASTM C 1260 และทดสอบการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C1567 ทดสอบหาร้อยละของช่องว่างในมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้วตาม มาตรฐาน ASTM C 642 และ ทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์และคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน

#### 3.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของหินปูน

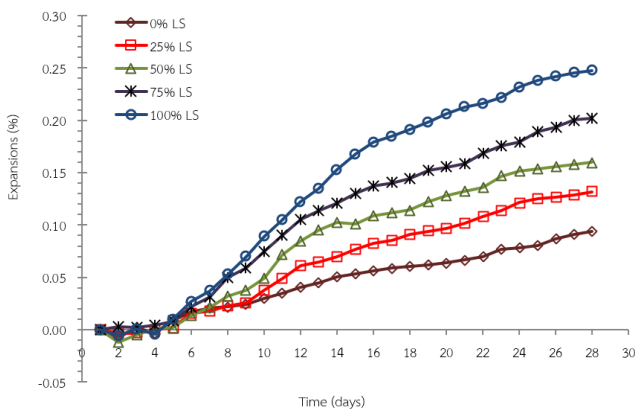
จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C127 พบว่า หินปูน มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.824 ความถ่วงจำเพาะที่สภาพ SSD เท่ากับ 2.83 ความถ่วงจำเพาะปรากฏเท่ากับ 2.84 และมีการดูดซึมร้อยละ 0.237 ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของหินปูน

คุณสมบัติ	หินปูน (หินฝุ่น)
ความถ่วงจำเพาะทั้งหมด (Bulk specific gravity)	2.824
ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดที่สภาพ SSD	2.830
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent specific gravity)	2.840
การดูดซึม (Absorption)(%)	0.237

#### 3.2 ผลการตรวจสอบความไวต่อปฏิกิริยา ASR ของหินปูน

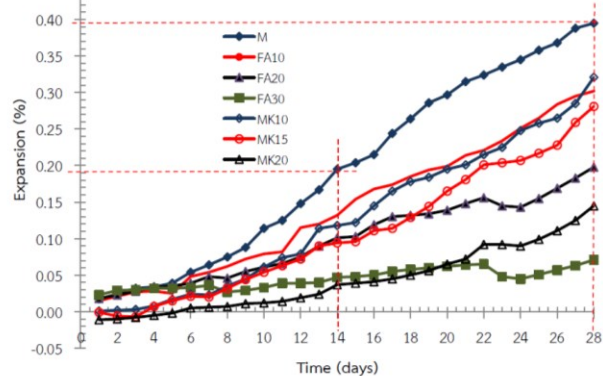
เมื่อพิจารณาแนวโน้มความไวในการเกิดปฏิกิริยาของหินปูนตามภาพที่ 2 พบว่าการขยายตัวที่เกิดจากการแทนที่หินแกรนิตด้วยหินปูนในสัดส่วนผสมจากน้อยไปมากจะส่งผลให้เกิดการขยายตัวในอัตราที่เพิ่มขึ้นเพิ่มสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณการแทนที่ 0, 25, 50, 75 และ 100 ตามลำดับ



ภาพที่ 2 การขยายตัวกับเวลาแสดงผลกระทบของการแทนที่ของหินแกรนิต ด้วยหินปูนที่ระดับการแทนที่ร้อยละ

ในขณะที่ค่าการขยายตัวสูงสุดร้อยละ 0.153, 0.121, 0.103, 0.070 และ 0.051 ที่อายุ 14 วัน (หลังการหล่อตัวอย่าง) ของ (GN/100% LS), (GN/75%LS), (GN/50%LS), (GN/25%LS) และ (GN/ 0%LS) ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการขยายตัวที่อายุ 28 วันของแท่งมอร์ตาร์ก็จะให้แนวโน้มการขยายตัวสอดคล้องกันกับที่ 14 วัน

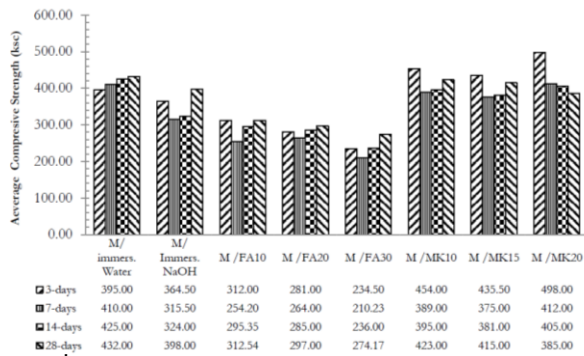
3.3 ผลทดสอบแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาASR ในมอร์ตาร์ด้วยวิธีการเร่งตามมาตรฐาน ASTM C 1260และ ASTM C 1567 เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มการขยายตัวเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลน์ซิลิกาพบว่า การขยายตัวที่อายุ 14 และ 28 วัน ของมอร์ตาร์ควบคุม (M) ของหินปูน (LS-CB) ขยายตัวมากที่สุดร้อยละ (0.195, 0.395) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการใช้สารปอซโซลานในส่วนผสมพบว่า มีประสิทธิภาพในการควบคุมการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาแอลคาไลน์ ซิลิกาของถ้ำลอย (FA) และดินขาว (MK) แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ FA30 และ MK20 ที่อายุ 14 วัน และ 28 วัน ให้ค่าการขยายตัวน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ (0.047, 0.071) FA, (0.037,0.0145) MK ตามลำดับ โดยใช้หินปูน (ฝุ่น) เป็นส่วนผสม นอกจากนั้นเปรียบเทียบผลการใช้สารปอซโซลานเมื่อใช้ดินขาวจะควบคุมการขยายตัวได้ดีกว่าแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ้ำลอยร้อยละ 10 ร้อยละ20 และ 30 โดยน้ำหนัก ตามลำดับของหินปูน (ฝุ่น) ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์แนวโน้มการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์แทนที่ซีเมนต์ด้วยปอซโซลานกับแท่งมอร์ตาร์ควบคุมใช้หินปูน

#### 3.4 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์เนื่องจากปฏิกิริยา ASR

ผลการทดสอบการพัฒนา กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลา 3, 7, 14 และ 28 วันตามภาพที่ 4 พบว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างควบคุมที่อยู่ในสภาวะปกติมีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 395, 410, 452 และ 432 กก./ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ มากกว่าที่แช่ใน NaOH ทุกอายุกำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 364.5, 315, 324 และ 398 กก./ซม<sup>2</sup>



ภาพที่ 4 ผลกระทบของกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ลูกบาศก์ของสารปอซโซลานต่างๆกับมอร์ตาร์ควบคุม

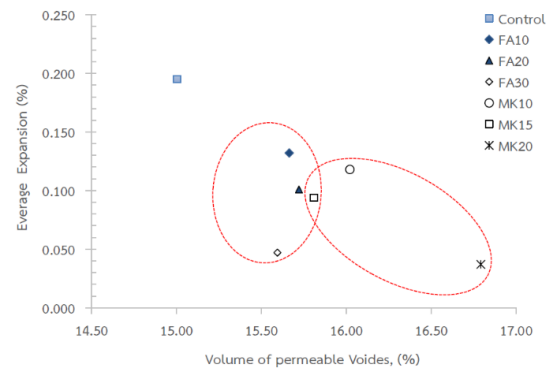
กำลังอัดเฉลี่ยมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการแช่ในน้ำปกติจะให้กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของมอร์ตาร์มากกว่าแช่ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 80°C ในขณะที่ระบบสองประสานของเถ้าลอยพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่เพิ่มขึ้นตามอายุจาก 3, 7, 14, 28 วัน และมีค่ากำลังรับแรงอัด 312, 254.20, 295.35 และ 312.54 กก./ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ และสำหรับส่วนผสมด้วยดินขาว (MK20) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด และมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 498, 412, 405 และ 385กก./ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ มากกว่าส่วนผสมแทนที่ด้วยดินขาว(MK10) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังรับแรงอัด 435.5, 375, 381 และ 415 กก./ซม<sup>2</sup> และส่วนผสมด้วยดินขาว (MK15) ร้อยละ 15 มีค่ากำลังรับแรงอัด 435.5, 375, 381 และ 415 กก./ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ

3.5 ผลทดสอบหาร้อยละของปริมาตรช่องว่าง ที่ของเหลวซึมผ่านมอร์ตาร์ที่แข็งตัวได้ตามมาตรฐาน ASTM C642-06 [13]

ผลการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ควบคุมมีร้อยละของปริมาตรต่ำที่สุดมีค่าร้อยละ 15.003 ส่งผลให้การขยายตัวมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 0.195 และ 0.395 ที่อายุ 14 วันและ 28 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในแต่ละส่วนผสมมีอัตราเพิ่มขึ้นร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักให้ค่าร้อยละของปริมาตรช่องว่างเพิ่มขึ้นเท่ากับ 15.664, 15.721 และ 15.595 ตามลำดับ และสำหรับดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์ของแต่ละส่วนผสมมีอัตราเพิ่มขึ้นร้อยละ 10, 15 และ 20ให้ค่าร้อยละของปริมาตรช่องว่างเพิ่มขึ้นเท่ากับ 16.021, 15.808 และ 16.792 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ร้อยละของช่องว่างและการขยายตัวของมอร์ตาร์

ลำดับ	ส่วนผสม	ร้อยละปริมาตรของช่องว่างซึมผ่านได้	ร้อยละการขยายตัว	
			14 วัน	28 วัน
1	M	15.003	0.195	0.395
2	M/FA10	15.664	0.132	0.302
3	M/FA20	15.721	0.101	0.198
4	M/FA30	15.595	0.047	0.071
5	M/MK10	16.021	0.118	0.321
6	M/MK15	15.808	0.094	0.281
7	M/MK20	16.792	0.037	0.145



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ของการขยายตัวและร้อยละของ

ช่องว่างของมอร์ตาร์กับมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 14 วัน ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัวกับร้อยละของปริมาตรของช่องว่างที่ซึมผ่านได้ที่อายุ 14 วัน และอายุ 28 วัน สังเกตว่าส่วนผสมที่มีดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์ ได้แก่ ตัวอย่าง MK20, MK15 และ MK10 มีค่าร้อยละของปริมาตรของช่องว่างที่ซึมได้ของมอร์ตาร์ มีค่ามากกว่า

#### 4. การอภิปราย (Discussion)

##### 4.1 ผลการตรวจสอบความไวต่อปฏิกิริยา ASR ของหินปูน

พบว่าหินปูนมีความไวต่อปฏิกิริยา ASR ได้ในกรณีนี้คือ หินปูนฝุ่นมีองค์ประกอบของซิลิกาสำหรับการก่อตัวของซิลิกาเจลซึ่งโดยทั่วไปแล้วมวลรวมหลายชนิดจะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักและสามารถทำปฏิกิริยาได้ (Reactive Silica) แต่มวลรวมไม่ทุกชนิดที่ซิลิกาจะทำปฏิกิริยาได้กล่าว คือลักษณะของซิลิกาจะต้องมีรูปแบบเป็นอสัณฐานหรือผลึกที่ไม่สมบูรณ์ (Poorly Crystallized) และเกิดจากแอลคาไลและไฮดรอกซิลไอออนทำลายโครงสร้างผลึกซิลิกาที่มีลักษณะเป็นโครงข่ายซิลิกาเสียหายจึงเป็นสาเหตุหลักทำให้สามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยา ASR

##### 4.2 สำหรับผลกระทบจากการควบคุมการเกิดปฏิกิริยา ASR

ได้หลายปัจจัย ปัจจัยหลักที่สำคัญ ได้แก่ ปริมาณอัลคาไลของคอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสม นอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานนี้จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ด้วยอัตราส่วนที่ต่ำของ CaO/SiO<sub>2</sub> จาก การเกิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์หมดไปในสารละลายที่อยู่ในช่องว่าง (Pore Solution) ของคอนกรีต เพราะว่าอัตราส่วนที่ต่ำของ CaO/SiO<sub>2</sub> นี้จะทำให้แอลคาไลน์ถูกจำกัด ดังนั้นการที่ลดปฏิกิริยาของทั้งสองนี้มีผลกระทบทำให้ปริมาณของไฮดรอก

ซิลิออนไม่สามารถมีส่วนร่วมในการทำปฏิกิริยาแอลคาไลน์ซิลิกา จึงทำให้ช่วยควบคุมการขยายตัวของมอร์ตาร์

4.3 การพัฒนากำลังอัดเฉลี่ยของมอร์ตาร์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุของการบ่ม สำหรับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยส่วนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นกำลังอัดเฉลี่ยมีแนวโน้มให้ค่าลดลงและกรณีแทนที่ด้วยดินขาวในปริมาณเพิ่มขึ้นพบว่ากำลังอัดเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นโดยทั้งสองกรณีนี้เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกช่วยปรับปรุงให้คุณสมบัติของมอร์ตาร์ดีขึ้น

4.4 ผลทดสอบร้อยละของปริมาตรช่องว่างที่ของเหลวซึมผ่านมอร์ตาร์ที่แข็งตัวได้ตามมาตรฐาน ASTM C642-06

ส่วนผสมที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยได้แก่ FA10, FA20 และ FA10 ในขณะที่มอร์ตาร์และคอนกรีตในภาวะปกติที่ไม่เกิดปฏิกิริยา ASR ค่าร้อยละของปริมาตรของช่องว่างควรมีค่าน้อยที่สุดหมายความว่า จะมีการขยายตัวน้อยที่สุด แต่จากการทดสอบพบว่า มอร์ตาร์ควบคุม เนื่องจากส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (FA30) ด้วยร้อยละที่มากกว่าตัวอย่าง FA20 และ FA10 เมื่อเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตให้ทึบแน่น และช่วยลดปริมาณของซิลิกาเจลที่มีอยู่ในช่องว่างเหลือน้อยลง ซึ่งทำให้ปริมาตรร้อยละของช่องว่างเหลือน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม (เมื่อ Silica gel เกิดขึ้นและสามารถซึมผ่านช่องว่างในมอร์ตาร์ได้ และก่อตัวอยู่ในช่องว่างนั้น) จึงมีผลทำให้ร้อยละปริมาตรของช่องว่างของมอร์ตาร์ควบคุมมีค่าต่ำมากที่สุด แต่ให้การขยายตัวสูงที่สุด

## 5. สรุปผล (Conclusion)

ปฏิกิริยาของมวลรวมมีแนวโน้มเกิดปฏิกิริยาได้ ในกรณีนี้คือ หินปูน หินฝุ่น (LS) มีองค์ประกอบของซิลิกาสำหรับใช้ในการทำปฏิกิริยา ทำให้เกิดการก่อตัวของซิลิกาเจล และส่งผลให้เกิดการขยายตัวซึ่งเมื่อใช้สารปอซโซลานิกคือเถ้าลอยและดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะช่วยปรับปรุงดังนี้

1. เถ้าลอยและดินขาวช่วยลดความพรุนและทำให้มีความทึบแน่นภายในมอร์ตาร์และคอนกรีต ทำให้ลดการเคลื่อนที่แลกลื่นความชื้น แอลคาไลน์ และไฮดรอกซิลิออนในสารละลายในช่องว่างของคอนกรีต

2. ปริมาณอัลคาไลของมอร์ตาร์และคอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้วัสดุปอซโซลานิกแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสม โดยเฉพาะส่วนผสมของตัวอย่าง MK20 และ FA30 ให้ค่าการขยายตัวลดลงต่ำใกล้เคียงกัน

3. ปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ด้วยอัตราส่วนที่ต่ำของ  $\text{CaO/SiO}_2$  จากการเกิดของ (C-S-H) จะทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์หมดไปที่อยู่ในสารละลายใน

ช่องว่างของคอนกรีต เนื่องจากอัตราส่วนที่ต่ำของ  $\text{CaO/SiO}_2$  นี้ จะทำให้แอลคาไลน์ถูกจำกัด ดังนั้นการที่ลดปฏิกิริยาของทั้งสองนี้มีผลกระทบทำให้ปริมาณของไฮดรอกซิลิออนไม่สามารถมีส่วนร่วมในการทำปฏิกิริยาแอลคาไลน์ซิลิกา จึงทำให้ช่วยควบคุมการขยายตัวของคอนกรีต

4. ปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ด้วยมีผลต่อกำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

## 6. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เป็นงบประมาณรายจ่ายปี 2564 และขอบคุณเจ้าหน้าที่สาขาวิศวกรรมโยธา ที่พระนครเหนือที่ช่วยให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบวัสดุ ข้อมูล และการทดสอบบางส่วนจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ บริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด

## 7. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] T.E. Stanton, Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 66 (10) (1940) 1781-811.
- [2] T.E. Stanton, Studies of use of pozzolans for counteracting excessive concrete 684 expansion resulting from reaction between aggregates and the alkalis in cement, In Symposium on Use of Pozzolanic Materials in Mortars and Concretes, ASTM International, 1950.
- [3] W.F. Cole, C.J. Lancucki, M.J. Sandy, Products formed in an aged concrete, Cem. Concr. Res. 11(3) (1981) 443-454.
- [4] K. Ono, Damaged concrete structures in Japan due to alkali silica reaction, Inter. J. Cem. Compos. Light. Concr. 10(4), (1988) 247-57.
- [5] M.A. Bérubé, J. Duchesne, J.F. Dorion, M. Rivest, Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity, Cem. Concr. Res. 32(8) (2002).
- [5] R. N. Swamy, Alkali-Silica Reaction in Concrete, Glasgow and London: Blackie and Son Ltd., (1992).

- [6] M. Thomas, A. Dunster, P. Nixon, B. Blackwell, Effect of fly ash on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction–Exposure site studies, *Cem. Concr. Comp.* 33(3) (2011) 359-367.
- [7] G. Li, Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>, *Cem. 788 Concr. Res.* 34(6) (2004) 1043-1049.
- [8] P.S. De Silva, F.P. Glasser, Pozzolanic activation of metakaolin, *Adv Cem Res* 4 (16) (1992)
- [9] J.A. Kostuch, V. Walters, T.R. Jones, High performance concretes incorporating metakaolin: A review, R.K. Dhir, M.R. Jones (Eds.), *Concrete 2000*, Vol. 2, E&FN Spon, London, 1993, pp. 1799± 1811.
- [10] ASTM C1260 - Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method). American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA (2001).
- [11] ASTM C1567 - Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combination of Cementitious Materials and Aggregates (Accelerated Mortar Bar Method). American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA (2008).
- [12] M.H. Shehata, M.D. Thomas, Use of ternary blends containing silica fume and fly ash 730 to suppress expansion due to alkali-silica reaction in concrete, *Cem. Concr. Res.* 32(3) 731 (2002) 341-349.
- [13] ASTM C642. 1997. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete. West Conshohocken, P.A.: ASTM International.