



Journal of Thailand Concrete Association วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

EFFECT OF FINENESSES OF FLY ASH AND RICE HUSK ASH ON COMPRESSIVE STRENGTH AND EXPANSION OF MORTAR IN ACCELERATED MORTAR BAR METHOD

ผลกระทบของความละเอียดของเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบต่อกำลังอัดและการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่เร่งโดยใช้สารละลาย NaOH ที่อุณหภูมิสูง

สุวัฒน์ งามจันทร์¹ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร² ชัย จาตุรพิทักษ์กุล³

¹นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ARTICLE INFO:

Received: August 5, 2016

Received Revised Form:

December 20, 2016

Accepted: January 16, 2017

ABSTRACT:

This research studied compressive strength and expansion of mortar containing fly ash and rice husk ash. Both fly ash and rice husk ash were ground until the particles were retained on a sieve No. 325 were 35 ± 2 , 25 ± 2 , 15 ± 2 , and $5\pm 2\%$ by weight. Then, they were used to replace Portland cement type I at 20% by weight of binder to cast mortars and the flow of mortars was controlled at $110\pm 5\%$ by adjusting the mixing water. Compressive strengths of mortars were determined at the ages of 7, 14, 28, 60 and 90 days. The expansion of mortar in accelerated mortar bar method was investigated by immersing mortar bars in 1N sodium hydroxide (NaOH) solution at the temperature of 80°C for 28 days. The non-reactive aggregate was used as a fine aggregate in order to study the effect of pozzolanic materials on expansion of mortar in accelerated mortar bar method. The results showed that the high fineness of rice husk ash and fly ash was more effective in increasing the compressive strength and less expansion than the low fineness of rice husk ash and fly ash. Moreover, mortars containing ground fly ash and ground rice husk ash could produce higher compressive strength than control mortar at the age of 60 days or more. However, both ground and unground rice husk ash may not suitable to be used as a pozzolan for controlling the ASR expansion potential.

KEYWORDS: Fly ash, Rice husk ash, Expansion, Sodium hydroxide, Fineness

**Corresponding Author,*

Email address: tience14@hotmail.com

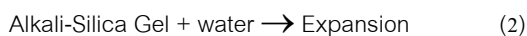
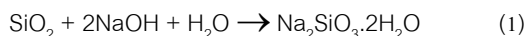
บทคัดย่อ:

บทความนี้ศึกษาการกักน้ำและการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ ซึ่งเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบได้ปรับปรุงความละเอียดโดยการบดให้มือนาขนาดข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 35 ± 2 , 25 ± 2 , 15 ± 2 และ 5 ± 2 โดยน้ำหนัก จากนั้นใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเพื่อห่อมอร์ตาร์โดยควบคุมให้การขยายตัวของมอร์ตาร์ที่แรงโดยใช้สารละลาย NaOH ที่อุณหภูมิสูง โดยนำแท่งมอร์ตาร์แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 1 N ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 28 วัน และส่วนผสมของมอร์ตาร์ใช้มวลรวมที่ไม่ทำปฏิกิริยา เพื่อให้การขยายตัวของมอร์ตาร์ดังกล่าวมาจากผลของการใช้วัสดุปอซโซลาน ผลทดสอบพบว่าเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงเพิ่มประสิทธิภาพต่อการกักน้ำ และมีการขยายตัวของมอร์ตาร์ต่ำกว่าเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดต่ำ นอกจากนั้นมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบที่บดละเอียดมีค่าการกักน้ำสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ตั้งแต่อายุ 60 วัน อย่างไรก็ตามพบว่าเถ้าแกลบทั้งที่บดและไม่บดละเอียดอาจจะไม่เหมาะสมเป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อใช้ควบคุมแนวโน้มการขยายตัวจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา

คำสำคัญ: เถ้าถ่านหิน, เถ้าแกลบ, การขยายตัว, โซเดียมไฮดรอกไซด์, ความละเอียด

1. บทนำ

ปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา (Alkali-Silica Reaction) เป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดความเสียหาย ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างซิลิกาที่ไวต่อปฏิกิริยาในมวลรวมและอัลคาไลในซีเมนต์เพสต์ โดยมี 3 ปัจจัยหลัก คือ ต่างในปูนซีเมนต์, ความชื้น, และซิลิกาที่ไวต่อปฏิกิริยาในมวลรวม เมื่อมีองค์ประกอบครบ 3 ประการเกิดเป็นอัลคาไล-ซิลิกาเจล (silica gel) ดังแสดงในสมการที่ (1) [1] เมื่อมีความชื้นหรือปริมาณน้ำที่เพียงพออัลคาไล-ซิลิกาเจลจะดูดน้ำ ทำให้เกิดการขยายตัวใหญ่ขึ้นและเกิดแรงดันรอบมวลรวม ดังแสดงในสมการที่ (2) [1] ส่งผลให้คอนกรีตเกิดรอยแตกกว้างทั่วบริเวณโดยอาจพบในลักษณะแผ่นหรือลักษณะอื่น



นอกจากนี้ได้มีการศึกษาวัสดุที่นำมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ได้แก่ เถ้าถ่านหิน (Fly Ash) ซึ่งได้จากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า จัดเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีและนิยมนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมคอนกรีต ในปัจจุบันการใช้เถ้าถ่านหินมีจำนวนมาก ส่วนใหญ่จะใช้ใน

อุตสาหกรรมคอนกรีตเนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่คอนกรีตทั้งในด้านกำลังและความทนทาน

ส่วนเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) เป็นผลพลอยได้จากการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงในการเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โรงสีบางแห่งเผาแกลบเพื่อนำความร้อนไปใช้ในการไล่ความชื้นให้แก่ข้าว อย่างไรก็ตามเถ้าแกลบมีการนำไปใช้ประโยชน์น้อยแม้ว่าการใช้เถ้าแกลบสามารถลดต้นทุนของคอนกรีตตลอดจนเพิ่มคุณสมบัติบางประการให้แก่คอนกรีตได้ ขณะที่การนำไปใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ไม่เกี่ยวข้องกับงานคอนกรีต เช่น การถมที่ หรือนำไปทำปุ๋ย จึงมีปริมาณเถ้าแกลบเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดปัญหาด้านการกำจัด และก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม

เถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อปรับปรุงสมบัติหลายประการแก่มอร์ตาร์และคอนกรีตได้ แต่ต้องมีความละเอียดสูง ซึ่งประจักษ์ และคณะ [2] พบว่าการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง ส่วนการใช้เถ้าถ่านหินในส่วนผสมมอร์ตาร์สามารถลดการหดตัวแบบอโดจินัสได้ [3] นอกจากนี้วัสดุปอซโซลานหลายชนิดสามารถนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับ

ปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาเมื่อใช้วัสดุปอซโซลานในส่วนผสมของมอร์ตาร์และคอนกรีต ได้แก่ Zebino และคณะ [4] พบว่ามอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก มีการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาลดลง แต่เมื่อแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 25 มีการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาเพิ่มขึ้นเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าถ่านหินผสมเมทาเคิลิน [5] มีการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาลดลงขึ้นอยู่กับปริมาณที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านหินและเถ้าถ่านหินผสมเมทาเคิลินในปริมาณที่สูงขึ้น นอกจากนี้ในประเทศไทยได้มีการศึกษาอิทธิพลของหินชนิดต่างๆ ต่อปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา โดยสุวิมล และคณะ [6] ได้ทดสอบหินที่ได้จากภาคตะวันออกของประเทศไทย 6 ชนิด พบว่ามีหิน 3 ชนิดที่มีแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา ได้แก่ หินปูน และหินแกรนิตจาก 2 แหล่ง

ถึงแม้มีการศึกษาผลกระทบด้านดีของเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบต่อการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาเป็นจำนวนหนึ่ง [7-9] แต่การศึกษาถึงผลกระทบของความละเอียดของเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบต่อแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกายังมีไม่มากนัก นอกจากนี้ผลการศึกษาการใช้เถ้าแกลบต่อปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่ผ่านมายังไม่สามารถสรุปได้ว่าเถ้าแกลบช่วยลดหรือเพิ่มการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการใช้เถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อศึกษาผลกระทบของเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบที่มีความละเอียดแตกต่างกันต่อกำลังอัดและการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่เร่งโดยใช้สารละลาย NaOH ที่อุณหภูมิสูง

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ส่วนเถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้า จังหวัดสุพรรณบุรี นำเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานโดยตรงไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม. เพื่อขจัดความชื้น จากนั้นนำเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบไปบดจนมีความละเอียดของอนุภาคค้ำ

บนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 35±2, 25±2, 15±2, และ 5±2 โดยน้ำหนัก

มวลรวมละเอียดที่ใช้ทดสอบกำลังอัดและแนวโน้มการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาของมอร์ตาร์ ได้จากการนำหินปูนมาบดให้มีขนาดละเอียดตาม ASTM C1260 [10] ซึ่งแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในส่วนผสม

ขนาดตะแกรง		มวล (%)
ผ่าน	ค้าง	
4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)	2.36 มิลลิเมตร (เบอร์ 8)	10
2.36 มิลลิเมตร (เบอร์ 8)	1.18 มิลลิเมตร (เบอร์ 16)	25
1.18 มิลลิเมตร (เบอร์ 16)	600 ไมโครเมตร (เบอร์ 30)	25
600 ไมโครเมตร (เบอร์ 30)	300 ไมโครเมตร (เบอร์ 50)	25
300 ไมโครเมตร (เบอร์ 50)	150 ไมโครเมตร (เบอร์ 100)	15

2.2 ส่วนผสมมอร์ตาร์

ส่วนผสมของมอร์ตาร์ในการทดสอบกำลังอัด และการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่เร่งโดยใช้สารละลาย NaOH ที่อุณหภูมิสูง ใช้อัตราส่วนของวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 ต่อ 2.25 โดยน้ำหนัก และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบที่มีความละเอียดต่างกันร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยปรับปริมาณน้ำเพื่อควบคุมค่าการไหลเพื่อให้อยู่ในช่วงร้อยละ 110±5 ดังแสดงในตารางที่ 2

2.3 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุมและมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบเป็นตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 5 ซม. ถอดแบบหลังจากหล่อมอร์ตาร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัว และทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่อง UTM (Universal Testing Machine) โดยทดสอบที่อายุ 7, 14, 28, 60, และ 90 วัน ค่ากำลังอัดแต่ละอายุทดสอบได้จากค่าเฉลี่ยของ 5 ตัวอย่าง ซึ่งแต่ละตัวอย่างต้องมีค่าไม่ต่างจากค่าเฉลี่ยร้อยละ 8.7 ตามที่ระบุใน ASTM C109 [11]

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของมอร์ตาร์

ตัวอย่าง	ส่วนผสม (โดยน้ำหนัก)			อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน	ค่าการไหลแผ่ (%)
	ปูนซีเมนต์	วัสดุปอซโซลาน	มวลรวมละเอียด		
CT	1.00	-	2.25	0.44	106
OFA20				0.45	110
25FA20	0.80	0.20	2.25	0.45	115
15FA20				0.44	109
5FA20				0.44	114
ORHA20				0.60	112
35RHA20				0.52	111
25RHA20	0.80	0.20	2.25	0.50	107
15RHA20				0.50	109
5RHA20				0.50	111

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้

- CT คือ มอร์ตาร์ควบคุม
- OFA และORHA คือ มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบที่มีความละเอียดก่อนบด (Original Size)
- 25, 15 และ 5FA คือ มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 25±2, 15±2 และ 5±2 โดยน้ำหนัก
- 35, 25, 15 และ 5RHA คือ มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบที่มีความละเอียดค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 35±2, 25±2, 15±2 และ 5±2 โดยน้ำหนัก
- 20 คือ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินหรือเถ้าแกลบร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

2.4 การทดสอบการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์

การศึกษาครั้งนี้ต้องการศึกษาผลของการใช้เถ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบต่อการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่เร่งโดยใช้สารละลาย NaOH ที่อุณหภูมิสูงเป็นหลัก โดยใช้วิธีทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบการขยายตัวเนื่องปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาและใช้มวลรวมที่ไม่ทำปฏิกิริยา เพื่อให้การขยายตัวของมอร์ตาร์ดังกล่าวมาจากผลของการใช้วัสดุปอซโซลาน ได้แก่ เถ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบเป็นหลัก ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1260 [10] โดยหล่อมอร์ตาร์ที่มีขนาดหน้าตัด 2.5 × 2.5 ซม. ยาว 28.5 ซม. ถอดแบบหลังจากหล่อมอร์ตาร์ 24 ชม. นำตัวอย่างไปบ่มน้ำที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชม. นำมาวัดความยาวเริ่มต้น จากนั้นนำมอร์ตาร์ไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 1 N ที่มีปริมาตรเป็น 4 เท่าของปริมาตรตัวอย่างที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของมอร์ตาร์ตาม ASTM C490 [12] เป็นเวลา 14 วัน หากไม่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวให้วัดไปถึง

28 วัน บันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงความยาว และคำนวณหาความยาวที่เปลี่ยนไปตามสมการที่ (3)

$$L = \frac{L_x - L_i}{G} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ L = ค่าความยาวที่เปลี่ยนไป (%), L_x = ค่าความยาวที่วัดได้ในเวลาใดๆ (มม.), L_i = ค่าความยาวเริ่มต้นที่วัดได้ (มม.), และ G = ระยะความยาวที่ระบุ (Nominal Gauge Length)

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 สมบัติกายภาพของวัสดุ

3.1.1 ความถ่วงจำเพาะ

ตารางที่ 3 ได้แสดงสมบัติทางกายภาพของวัสดุ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.14 ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานโดยตรงมีค่าเท่ากับ 2.33 และ 1.89 ตามลำดับ เมื่อปรับปรุงความละเอียดของเถ้าถ่านหิน พบว่าเถ้าถ่านหิน 5FA มีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็น 2.41 ส่วนเถ้าแกลบ 35RHA และ 5RHA มีความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็น 2.12 และ 2.31

ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา คือ 2.39 สำหรับเถ้าถ่านหิน [13, 14] และระหว่าง 1.9-2.3 [15] สำหรับเถ้าแกลบ เถ้าถ่านหินที่ได้จากโรงงานโดยตรงมีความพรุนต่ำ เมื่อปรับปรุงความละเอียดส่งผลให้มีความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่สำหรับเถ้าแกลบที่ปรับปรุงความละเอียดให้มีความละเอียดที่สูงขึ้น ทำให้ความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากอนุภาคของเถ้าแกลบจากโรงงานโดยตรงมีความพรุนค่อนข้างสูง หลังจากการบดเพื่อเพิ่มความละเอียด ทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลง และปริมาณรูพรุนน้อยลงเช่นกัน [16-19]

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ตัวอย่าง	ความถ่วงจำเพาะ	น้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (%)
ปูนซีเมนต์	3.14	-
OFA	2.33	32.8
25FA	-	25.6
15FA	-	16.9
5FA	2.41	5.0
ORHA	1.89	76.6
35RHA	2.12	35.2
25RHA	-	26.7
15RHA	-	13.5
5RHA	2.31	4.2

3.1.2 ความละเอียดของวัสดุ

ตารางที่ 3 พบว่าอนุภาคของเถ้าถ่านหินจากโรงงานโดยตรงที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 มีค่าร้อยละ 32.8 ดังนั้นจึงไม่มีเถ้าถ่านหินที่มีอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 35 ± 2 (35FA) ส่วนความละเอียดของเถ้าถ่านหินบด พบว่าสามารถบดจนมีอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 25, 15, และ 5 อยู่ในช่วง ± 2 ตามที่กำหนด ส่วนเถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานโดยตรงมีอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 76.6 ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 [20] กำหนดไว้ที่ไม่เกินร้อยละ 34 สำหรับวัสดุปอซโซลาน สำหรับเถ้าแกลบ 35RA, 25RA, 15RA, และ 5RA มีอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 35.2, 26.7, 13.5, และ 4.2 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงที่กำหนด

3.2 สมบัติทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, เถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบได้จากการทดสอบ X-ray Fluorescence (XRF) โดยผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีองค์ประกอบหลักคือ CaO ร้อยละ 65.4, MgO ร้อยละ 1.3, ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ร้อยละ 1, มี SO_3 ไม่เกินร้อยละ 2.7 และยังมีปริมาณอัลคาไลเทียบเท่า (Alkali Content หรือ $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) เท่ากับร้อยละ 0.6 ซึ่งถือเป็นปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลต่ำ [21]

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์	เถ้าถ่านหิน	เถ้าแกลบ
Silicon Dioxide (SiO_2)	20.9	33.9	93.5
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	4.8	17.4	0.2
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	3.4	13.0	0.4
Calcium Oxide (CaO)	65.4	25.7	0.9
Sulfur Trioxide (SO_3)	2.7	3.4	0.2
Magnesium Oxide (MgO)	1.3	1.9	0.4
Sodium Oxide (Na_2O)	0.3	1.2	-
Potassium Oxide (K_2O)	0.4	2.5	3.3
$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$	0.6	2.8	2.1
Loss On Ignition (LOI)	1.0	2.9	8.7

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ของเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน พบว่าเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบมีองค์ประกอบดังกล่าวเท่ากับร้อยละ 64.3 และ 94.1 ตามลำดับ ส่วน SO_3 ของเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบไม่เกินร้อยละ 5 และ 4 ตามลำดับ สำหรับค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ของเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบมีค่าเท่ากับร้อยละ 2.9 และ 8.7 ตามลำดับ ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบอยู่ในเกณฑ์ที่ ASTM C618 [20] กำหนดสำหรับเถ้าถ่านหิน class C และวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ class N ตามลำดับ

การทดสอบปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาต้องพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของ Na_2O และ K_2O หากมีองค์ประกอบดังกล่าวสูงเกินไปทำให้วัสดุประสานมีความเป็นด่างสูงอาจมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาได้ สำหรับเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบพบว่ามีปริมาณอัลคาไลเทียบเท่า (Alkali Content หรือ

Na₂O equivalent) เท่ากับร้อยละ 2.8 และ 2.1 ตามลำดับ ส่วนมวลรวมที่ใช้เป็นหินปูน ซึ่งเป็นมวลรวมประเภทไม่มีอันตราย (Innocuous) จากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา [22, 23] ทั้งนี้การใช้มวลรวมที่ไม่ทำปฏิกิริยากับด่างเพื่อศึกษาผลกระทบของเถาเถาหินและเถาเถาเกลบต่อการขยายตัวจากวิธีการทดสอบปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาเท่านั้น

3.3 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์

ตารางที่ 2 พบว่ามอร์ตาร์ควบคุมที่ทำให้ค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 105-115 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.44 ซึ่งเป็นอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ค่อนข้างต่ำเนื่องจากอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 ต่อ 2.25 โดยน้ำหนัก จึงทำให้ปริมาณของซีเมนต์เพสต์สูง และหินปูนบดที่ใช้เป็นมวลรวมละเอียด มีขนาดละเอียด จึงทำให้ไหลแผ่ได้ดีขึ้น

3.4 กำลังอัดของมอร์ตาร์

ตารางที่ 5 กำลังอัดของมอร์ตาร์

ตัวอย่าง	กำลังอัด (กก/ซม ²) - (กำลังอัดเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม, %)				
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
CT	443 - (100)	497 - (100)	539 - (100)	581 - (100)	605 - (100)
OFA20	389 - (88)	435 - (88)	496 - (93)	573 - (99)	607 - (100)
25FA20	404 - (91)	453 - (91)	522 - (98)	607 - (105)	622 - (103)
15FA20	415 - (94)	470 - (95)	544 - (102)	648 - (112)	670 - (111)
5FA20	430 - (97)	483 - (97)	557 - (104)	705 - (122)	739 - (122)
ORHA20	266 - (60)	295 - (59)	327 - (61)	409 - (71)	439 - (73)
35RHA20	353 - (80)	394 - (79)	414 - (78)	494 - (85)	533 - (88)
25RHA20	387 - (87)	439 - (88)	461 - (86)	543 - (94)	565 - (93)
15RHA20	393 - (89)	457 - (92)	474 - (89)	554 - (96)	589 - (97)
5RHA20	407 - (92)	466 - (94)	479 - (90)	580 - (100)	608 - (101)

ตารางที่ 5 แสดงค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7, 14, 28, 60, และ 90 วัน พบว่ามอร์ตาร์ CT มีกำลังอัดเท่ากับ 443, 497, 539, 581, และ 605 กก/ซม² ตามลำดับ มอร์ตาร์ CT มีการพัฒนากำลังอัดได้อย่างรวดเร็วจนถึงอายุ 28 วัน และมีกำลังอัด

สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมเถาเถาหินมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานใกล้เคียง (มอร์ตาร์ OFA20 และ 25FA20) และเท่ากับ (มอร์ตาร์ 15FA20 และ 5FA20) มอร์ตาร์ควบคุม โดยมีค่า W/B อยู่ระหว่าง 0.44 ถึง 0.45 เนื่องจากอนุภาคของเถาเถาหินบดยังมีลักษณะกลมมนบางส่วน จึงไหลแผ่ได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้เถาเถาหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง แต่ความสามารถในการทำงานอยู่ในช่วงเดียวกัน [24, 25] ส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมเถาเถาเกลบทุกความละเอียดใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม โดยมีค่า W/B อยู่ระหว่าง 0.50 ถึง 0.60 เนื่องจากเถาเถาเกลบมีความพรุนสูง จึงดูดน้ำมาก ดังนั้นต้องใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมเพื่อให้ค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 105-115 แต่เมื่อบดเถาเถาเกลบให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น ทำให้มีความพรุนลดลง ส่งผลให้มอร์ตาร์ที่ผสมเถาเถาเกลบที่มีความละเอียดสูงขึ้นจึงมี W/B ลดลง

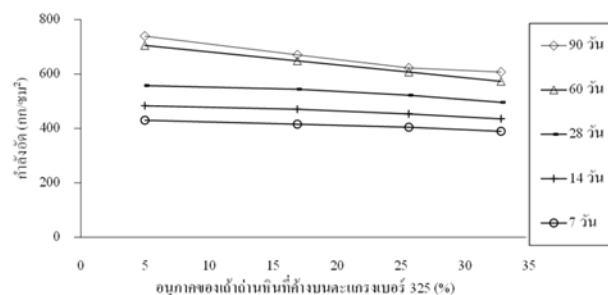
เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงอายุ 90 วัน มอร์ตาร์ CT มีกำลังอัดค่อนข้างสูง เนื่องจากใช้วัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดที่ 1 ต่อ 2.25 ทำให้มีปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้น และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มกำลังอัดโดยตรง อีกทั้งใช้

หินปูนย่อยที่มีขนาดละเอียดที่เป็นมวลรวมละเอียดจึงสามารถให้กำลังอัดที่ค่อนข้างสูง

3.4.1 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน

มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน OFA20, 25FA20, 15FA20, และ 5FA20 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 496, 522, 544, และ 557 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 93, 98, 102, และ 104 ของมอร์ตาร์ควบคุมตามลำดับ และที่อายุ 90 วันสามารถพัฒนา กำลังอัดเท่ากับ 607, 622, 670, และ 739 กก/ซม² หรือคิดเป็น ร้อยละ 100, 103, 111, และ 122 ของมอร์ตาร์ควบคุมตามลำดับ ซึ่งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินสามารถให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าร้อยละ 88 ของมอร์ตาร์ควบคุมทุกอายุการทดสอบ

มอร์ตาร์ OFA20 สามารถให้ค่ากำลังอัดใกล้เคียงและ เท่ากับมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 60 และ 90 วัน โดยคิดเป็นร้อยละ 99 และ 100 ตามลำดับ ส่วนมอร์ตาร์ 25FA20, 15FA20, และ 5FA20 มีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมตั้งแต่อายุ 60, 28, และ 28 วันตามลำดับ โดยมีค่าดัชนีกำลังระหว่างร้อยละ 102 ถึง 122 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของดิลก คุรต์นเวช [25] ที่ใช้เถ้าถ่านหิน บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่าดัชนีกำลังที่อายุ 28 และ 90 วัน เท่ากับร้อยละ 128 และ 120 ตามลำดับ และการแทนที่เถ้าถ่านหินที่ร้อยละ 25 มีค่ากำลังอัดเป็นร้อยละ 104 ถึง 109 ของมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 28 วัน [24]



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสม เถ้าถ่านหินกับอนุภาคของเถ้าถ่านหินที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325

รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์ ที่ผสมเถ้าถ่านหินกับอนุภาคของเถ้าถ่านหินค้ำบนตะแกรง เบอร์ 325 พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงให้ กำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดที่ต่ำกว่า

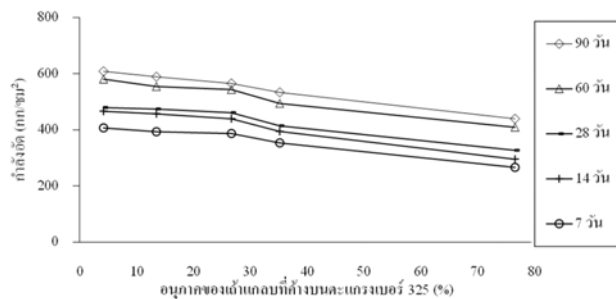
ในช่วงอายุ 7 ถึง 28 วัน ความละเอียดของเถ้าถ่านหินมีผลต่อ กำลังอัดไม่สูงมาก แต่หลังจากอายุ 60 เป็นต้นไป ความละเอียด ของเถ้าถ่านหินมีผลต่อกำลังอัดมากขึ้น เนื่องจากเถ้าถ่านหินที่มี ความละเอียดที่สูงขึ้นมีขนาดเล็กลง มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น จึงสามารถ ทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วและมากขึ้น อีกทั้งยังใช้อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุที่น้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดต่ำ จึงมีผลต่อกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย

3.4.2 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้ากลบ

ตารางที่ 5 พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้ากลบที่ได้จากโรงงาน โดยตรง (ORHA20) มีค่ากำลังอัดที่อายุ 7, 14, 28, 60, และ 90 วัน เท่ากับ 266, 295, 327, 409, และ 439 กก/ซม² หรือเท่ากับ ร้อยละ 60, 59, 61, 71, และ 73 ของมอร์ตาร์ควบคุมตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมค่อนข้างมาก เนื่องจากเถ้ากลบที่ไม่ได้ ปรับปรุงความละเอียดมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่มีอนุภาคค้ำบน ตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 77 ซึ่งสูงกว่าที่ ASTM C618 [20] กำหนดคือไม่เกินร้อยละ 34 ค่อนข้างมาก อีกทั้งยังใช้อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสานที่สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมมาก

เมื่อนำเถ้ากลบมาบดให้มีความละเอียดที่สูงขึ้น พบว่า มอร์ตาร์ 35RHA20, 25RHA20, 15RHA20, และ 5RHA20 มี กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 414, 461, 474, และ 479 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 78, 86, 89, และ 90 ของมอร์ตาร์ควบคุม ตามลำดับ เมื่อพิจารณากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้ากลบที่มี อนุภาคค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 35 พบว่า มอร์ตาร์ดังกล่าวมีค่ากำลังอัดสูงกว่าร้อยละ 78 ของมอร์ตาร์ ควบคุมทุกอายุการทดสอบ

มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้ากลบบดละเอียด (5RHA20) สามารถ ให้กำลังอัดเท่ากับหรือสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมได้ที่อายุ 60 วัน ขึ้นไป แม้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม เนื่องจากเถ้ากลบมีขนาดเล็กลง สามารถอุดรูพรุนของมอร์ตาร์ และทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ดี ส่งผลให้กำลังอัด สูงขึ้น ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา [26, 27] ที่ใช้ กลบ-เปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดย น้ำหนักวัสดุประสาน สามารถให้กำลังอัดเป็นร้อยละ 101 ถึง 103 ของมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 28 วัน และสูงขึ้นเป็นร้อยละ 106 ของ มอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 90 วัน



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเกล็ดกับอนุภาคของเถ้าถ่านหินที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าเกล็ดกับอนุภาคของเถ้าถ่านหินที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 พบว่าความละเอียดของเถ้าถ่านหินมีผลต่อกำลังอัดเช่นเดียวกับเถ้าถ่านหิน โดยในช่วงอายุต้น ความละเอียดของอนุภาคเถ้าถ่านหินที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 มากกว่าร้อยละ 25 มีผลต่อกำลังอัดอย่างชัดเจน แต่ที่ความละเอียดเพิ่มขึ้นจะมีต่อกำลังอัดไม่มาก เมื่อมอร์ตาร์มีอายุตั้งแต่ 60 วันเป็นต้นไป พบว่าความละเอียดของเถ้าถ่านหินมีผลต่อกำลังอัดอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากในช่วงอายุดังกล่าวปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถทำปฏิกิริยาได้ดี ดังนั้นเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดที่สูงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

3.5 การขยายตัวของมอร์ตาร์

ตารางที่ 6 แสดงค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่อายุ 14 และ 28 วัน พบว่ามอร์ตาร์ควบคุม CT มีค่าการขยายตัวที่ 14 วัน

เท่ากับร้อยละ 0.0151 ซึ่งยังไม่เห็นผลของการขยายตัว เนื่องจาก การขยายตัวน้อยกว่าร้อยละ 0.1 จึงทดสอบต่อไปจนถึงที่ 28 วัน พบว่าการขยายตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่ากับ 0.0247 ซึ่งมีการขยายตัวที่ต่ำกว่าตาม ASTM C1260 [10] กำหนดให้การขยายตัวที่อายุ 14 วันไม่เกินร้อยละ 0.1 ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมที่ใช้เป็นมวลรวมที่ไม่ทำปฏิกิริยา (Non-Reactive aggregate) ประกอบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ใช้มีปริมาณอัลคาไลต่ำที่ร้อยละ 0.6 ทำให้แท่งมอร์ตาร์ควบคุมไม่ได้รับผลกระทบจากการขยายตัวมากนัก และไม่เกิดรอยแตกร้าว ดังแสดงในรูปที่ 3 (ตัวอย่าง CT)

ตารางที่ 6 การขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ตาร์

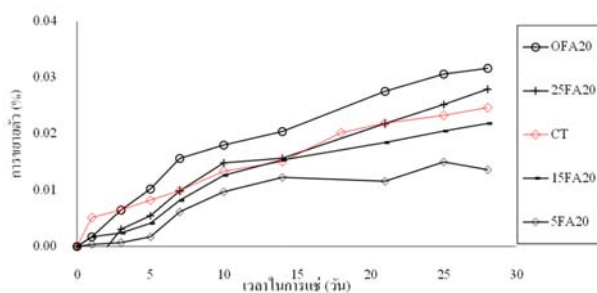
ตัวอย่าง	การขยายตัว (%) - (เทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม, เท่า)	
	14 วัน	28 วัน
CT	0.0151-(1.00)	0.0247-(1.00)
OFA20	0.0204-(1.35)	0.0317-(1.28)
25FA20	0.0157-(1.04)	0.0280-(1.13)
15FA20	0.0154-(1.02)	0.0219-(0.89)
5FA20	0.0123-(0.81)	0.0136-(0.55)
ORHA20	0.7688-(51)	0.7586-(31)
35RHA20	0.6047-(40)	0.5708-(23)
25RHA20	0.5118-(34)	0.5259-(21)
15RHA20	0.4625-(31)	0.4906-(20)
5RHA20	0.4221-(28)	0.4278-(17)



รูปที่ 3 ลักษณะผิวของมอร์ตาร์ควบคุม CT และมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดต่างกันหลังทดสอบการขยายตัวเป็นเวลา 28 วัน

3.5.1 การขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน

ตารางที่ 6 พบว่ามอร์ตาร์ OFA20 มีค่าการขยายตัวที่ 14 และ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 0.0204 และ 0.0317 ตามลำดับ ขณะที่มอร์ตาร์ 25FA20, 15FA20 และ 5FA20 มีค่าการขยายตัวที่ 14 และ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 0.0157 และ 0.0280, ร้อยละ 0.0154 และ 0.0219, ร้อยละ 0.0123 และ 0.0136 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าร้อยละ 0.1 ค่อนข้างมาก นอกจากนี้มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 15 สามารถลดการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ 28 วัน โดยมีการขยายตัวคิดเป็น 0.89 เท่าของมอร์ตาร์ควบคุม CT



รูปที่ 4 การขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินกับเวลา ในการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

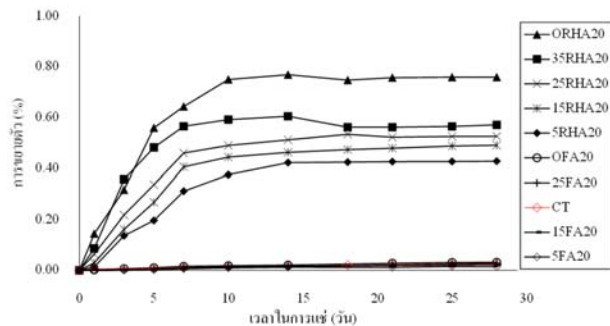
เมื่อพิจารณาข้อมูลของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินดังกล่าว ร่วมกับรูปที่ 4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินเทียบกับเวลาในการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าความละเอียดของเถ้าถ่านหินมีผลต่อการขยายตัว โดยเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงชันสามารถลดการขยายตัวของมอร์ตาร์ได้ดีขึ้น เนื่องจากเถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่าสามารถเข้าไปอุดช่องว่างภายในมอร์ตาร์ดีขึ้น ทำให้มอร์ตาร์มีความทึบน้ำมากขึ้น [28, 29] ส่งผลให้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึมเข้าไปเร่งการทำปฏิกิริยาของวัสดุประสานได้ยากขึ้น อีกทั้งเถ้าถ่านหินที่ละเอียดสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินที่หยาบ จึงไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีขึ้น และเหลือปริมาณต่างที่ไปทำปฏิกิริยากับสารละลายลดลง อย่างไรก็ตามมีเพียงมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินบดละเอียด (5FA20) เท่านั้นที่มีการขยายตัวต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมได้ที่ 14 วัน หรือมีการขยายตัวคิดเป็น 0.81 เท่าของมอร์ตาร์ควบคุม และลดลงไปที่ 0.55 เท่าของมอร์ตาร์ควบคุมที่ 28 วัน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่

ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินทำให้ปริมาณอัลคาไลในปูนซีเมนต์ลดลง จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาลดลงเช่นกัน การใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดจึงมีแนวโน้มในการลดการขยายตัวได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Sangsuwan และ Sujjavanich [30] ที่ศึกษาการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 20-50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่ามอร์ตาร์ดังกล่าวมีการขยายตัวลดลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาผลของเถ้าถ่านหินต่อปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา [31-35] อย่างไรก็ตามเนื่องจากการทดสอบนี้ใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลต่ำและใช้หินปูนที่ไม่เป็นอันตรายจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา ดังนั้นจึงมีการขยายตัวที่ต่ำมาก (ต่ำกว่าร้อยละ 0.10) และหากต้องการยืนยันผลการทำปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาของเถ้าถ่านหิน ควรดำเนินการวิจัยโดยทดสอบกับหิน (มวลรวม) ที่ไวต่อปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา

รูปที่ 3 แสดงลักษณะผิวของมอร์ตาร์ควบคุม CT และมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน ซึ่งพบว่ามีลักษณะผิวที่คล้ายกัน และไม่มี การแตกร้าวบริเวณผิวหน้า

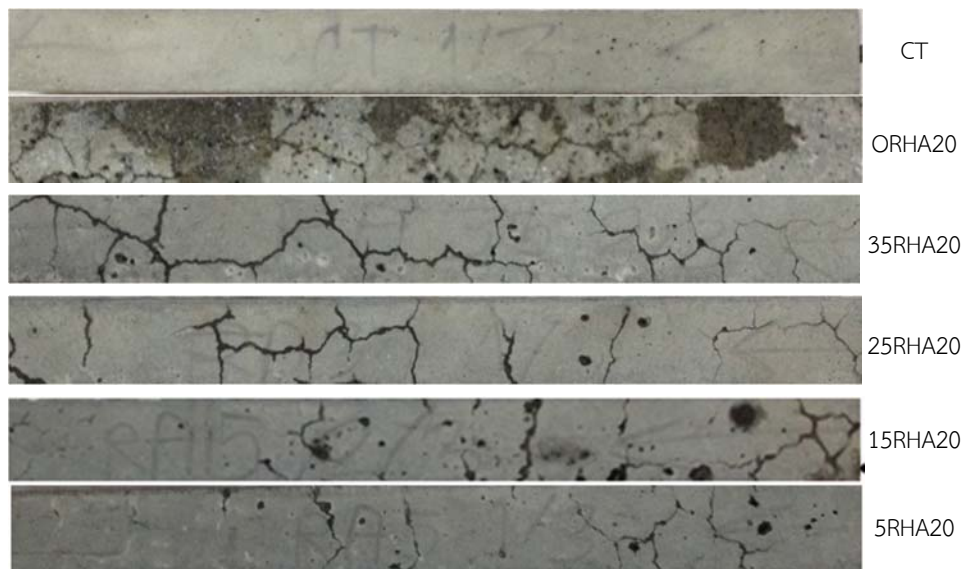
3.5.2 การขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ

ตารางที่ 6 พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานโดยตรง (ORA20) มีค่าการขยายตัวที่ 14 และ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 0.7688 และ 0.7586 หรือคิดเป็น 51 และ 31 เท่าของมอร์ตาร์ควบคุมตามลำดับ และมอร์ตาร์ 35RA20, 25RA20, 15RA20, และ 5RA20 มีการขยายตัวที่ 14 วันเท่ากับร้อยละ 0.6047, 0.5118, 0.4625, และ 0.4221 หรือคิดเป็น 40, 34, 31, และ 28 เท่าของมอร์ตาร์ควบคุมตามลำดับ และที่ 28 วันเท่ากับร้อยละ 0.5708, 0.5259, 0.4906, และ 0.4278 หรือคิดเป็นร้อยละ 23, 21, 20, และ 17 เท่าของมอร์ตาร์ควบคุมตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าแกลบในการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ทำให้การขยายตัวของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นอย่างมากทั้งความละเอียดสูงและความละเอียดต่ำ



รูปที่ 5 การขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหินกับเวลาในการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากรูปที่ 5 พบว่าความละเอียดของเถ้าแกลบมีผลกระทบต่อการขยายตัวอย่างมาก ตัวอย่างเช่น มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบที่ได้รับจากโรงงานโดยตรง (ORHA20) มีการขยายตัวที่ 14 วัน เท่ากับร้อยละ 0.7688 ขณะที่มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด (5RHA20) มีการขยายตัวลดลงประมาณ 2 เท่า หรือร้อยละ 0.4221 อย่างไรก็ตามมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบทั้งที่มีความละเอียดต่ำและความละเอียดสูงมีการขยายตัวที่สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมและมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินอยู่มาก



รูปที่ 6 ลักษณะผิวของมอร์ตาร์ควบคุม CT และมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบที่มีความละเอียดต่างกัน หลังการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลา 28 วัน

มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบทุกความละเอียดมีการขยายตัวที่สูงมาก ส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวในมอร์ตาร์ดังแสดงในรูปที่ 6 เนื่องจากเถ้าแกลบมีองค์ประกอบหลักของซิลิกา (SiO_2) อยู่มากกว่าร้อยละ 90 ถึงแม้เถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี ให้กำลังอัดกับมอร์ตาร์และสามารถมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมได้ แต่ปริมาณซิลิกาในเถ้าแกลบที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาได้รับการเร่งให้มีความไวในการทำปฏิกิริยาโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาดังกล่าวทำปฏิกิริยากับด่างในปูนซีเมนต์ทำให้การขยายตัวมอร์ตาร์สูงขึ้น ซึ่งมาจากซิลิกาในเถ้าแกลบมากกว่าซิลิกาในมวลรวม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zerbino และคณะ [4] ที่พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานโดยตรงร้อยละ 15 และ 25 มีการ

ขยายตัวที่อายุ 14 วันร้อยละ 0.38 และ 0.51 ตามลำดับ สำหรับมอร์ตาร์ควบคุมมีการขยายตัวที่ 14 วัน เพียงร้อยละ 0.11 นอกจากนี้การใช้เถ้าแกลบมีความเสี่ยงต่อการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา โดยความรุนแรงขึ้นอยู่กับอนุภาคของเถ้าแกลบ, ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ และปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ [4] อย่างไรก็ตามวัสดุปอซโซลานที่มีซิลิกาสูงบางชนิดไม่ส่งผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา เช่น ซิลิกาฟุ่มที่ศึกษาโดย Boddy และคณะ [36] ซึ่งซิลิกาฟุ่มสามารถลดผลกระทบจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา เมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 4 และ 8 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีการขยายตัวที่ 14 วันต่ำกว่าร้อยละ 0.1 ได้โดยใช้ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 12 การขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่ลดลงของมอร์ตาร์

ที่ผสมซิลิกาฟูม เนื่องจากซิลิกาฟูมประกอบด้วยซิลิกาในปริมาณสูง และมีความละเอียดสูง จึงทำปฏิกิริยาได้ดีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งป็นสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาได้ ทั้งนี้ซิลิกาที่อยู่ในซิลิกาฟูมหรือเถ้าถ่านหินเป็นซิลิกาที่อยู่ในรูปของควอตซ์ (Quartz) [37, 38] ซึ่งเป็นซิลิกาที่มีความเสถียร ขณะที่ซิลิกาในเถ้าแกลบเป็นซิลิกาในรูปคริสโตบาลีท์ (Cristobalite) [39] ซึ่งเป็นซิลิกาที่ไม่มีความเสถียร หากเถ้าแกลบถูกเผาในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 1,470 องศาเซลเซียส [40]

4. สรุปผลการทดสอบ

1. กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินมีกำลังอัดสูงกว่าร้อยละ 88 ของมอร์ตาร์ควบคุม และสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 28 วัน เมื่อใช้เถ้าถ่านหินที่มีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 15 อีกทั้งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูง (5FA20) สามารถให้กำลังอัดสูงถึงร้อยละ 122 ของมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 90 วัน

2. มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานโดยตรงมีกำลังอัดต่ำ แต่เมื่อใช้เถ้าแกลบที่บดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น สามารถให้กำลังอัดที่สูงกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุม และมีกำลังอัดเท่ากับมอร์ตาร์ควบคุมได้ที่อายุ 60 วัน สำหรับมอร์ตาร์ 5RHA20

3. การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงขึ้น ทำให้การขยายตัวของมอร์ตาร์ลดลง ซึ่งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5 มีการขยายตัวต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม จึงมีแนวโน้มที่สามารถใช้เพื่อลดการขยายตัวของมอร์ตาร์ได้ หากมอร์ตาร์มีส่วนผสมของมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา

4. ความละเอียดที่สูงขึ้นของเถ้าแกลบทำให้มอร์ตาร์มีการขยายตัวต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าแกลบที่มีความละเอียดต่ำ อย่างไรก็ตามเถ้าแกลบส่งผลต่อการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่สูงขึ้นอย่างมาก จึงไม่เหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุประสานเพื่อลดผลกระทบการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ใช่มวลรวมที่สามารถทำปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการทุนวิจัยและวิชาการตามแผนและกลยุทธ์เพื่อการพัฒนา (สัญญาเลขที่ CE-KMUTT 6002)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J.A. Farny and S.H., Kosmatka, "Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete", *Portland Cement Association*, pp. 1-26., 1997.
- [2] P. Toolkasikom, W. Tangchirapat, and C., Jaturapitakul, "Strength and Chloride Resistance of Recycled Aggregate Concrete Containing Ground Rice Husk Ash", *Journal of Thailand Concrete Association*, Vol. 2, No. 1, pp. 8-16., 2014.
- [3] S. Tongaroonsri, S. Hemavibool, P. Choktaweekarn, and S. Tangtermsirikul, "Effect of Bottom Ash on Autogenous Shrinkage of Binary Binder Mortar", *Journal of Thailand Concrete Association*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-8., 2015.
- [4] R. Zerbino, G. Giaccio, O. Batic, and G. Isaia, "Alkali-Silica Reaction in Mortars and Concretes Incorporating Natural Rice Husk Ash", *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp. 796-806, 2012.
- [5] T. Esteves, R. Rajamma, D. Soares, A. Silva, V. Ferreira, and J. Labrincha, "Use of Biomass Fly Ash for Mitigation of Alkali-Silica Reaction of Cement Mortars", *Construction and Building Materials*, Vol. 26, No. 1, pp. 687-693, 2012.
- [6] S. Sujavanich, W. Wongkamjan, K. Wan-in, M. Sarikaputi, and R. Guntapong, "Investigation of Alkali-Silica Reactivity Potential of Aggregate Sources in the Eastern Part of Thailand", *Journal of Thailand Concrete Association*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-8, 2014.
- [7] M.H. Shehata, and M.D. Thomas, "The Effect of Fly ash Composition on the Expansion of Concrete Due to

Alkali-Silica Reaction”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30 No. 7, pp. 1063-1072 , 2000.

[8] İ.B. Topçu, A.R. Boğa, and T. Bilir, “Alkali-Silica Reactions of Mortars Produced by Using Waste Glass as Fine Aggregate and Admixtures Such As Fly Ash and Li_2CO_3 ”, *Waste Management*, Vol. 28 No. 5, pp. 878-884, 2008.

[9] K. Ramyar, O. Çopuroğlu, Ö. Andıç, and A. Fraaij, “Comparison of Alkali-Silica Reaction Products of Fly-Ash-or Lithium-Salt-Bearing Mortar Under Long-Term Accelerated Curing”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 7, pp. 1179-1183, 2004.

[10] *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*, ASTM Standard C1260, 2014.

[11] *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, ASTM Standard C109/C109M, 2013.

[12], *Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete*, ASTM Standard C490/C490M.

[13] S. Airdeaw, “A Study of Concrete Properties Made from Calcium Carbide Residue Mixed with Fly Ash and Mixed with Palm Oil Fuel Ash as Binders”, M.S. thesis, Dept. Civil Eng, King Mongkut’s Univ. of Tech. Thonburi, Thailand, 2009. [In Thai]

[14] P. Thairit, “A Study of Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete made from the mixtures of Calcium Carbide Residue-Fly Ash and Calcium Carbide Residue-Bagasse Ash as Binders”, M.S. thesis, Dept. Civil Eng, King Mongkut’s Univ. of Tech. Thonburi, Thailand, 2000. [In Thai]

[15] P. Chindapasirt, and C. Jaturapitakkul, “Cement, Pozzolan, and Concrete”, *Thailand Concrete Association*. 381 p. 2008. [In Thai]

[16] W. Tangchirapat, T. Saeting, C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, and A. Siripanichgorn, “Use of Waste Ash

from Palm Oil Industry in Concrete”, *Waste Management*, Vol. 27, No. 1, pp. 81-88, 2007.

[17] J. Paya, J. Monzo, M.V. Borrachero, E. Peris, and F. Amahjour, “Mechanical Treatments of Fly Ashes Part IV: Strength Development of Ground Fly Ash-Cement Mortars Cured at Different Temperatures”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 4, pp. 543-551, 2000.

[18] C. Jaturapitakkul, and R. Cheerarot, “Development of Bottom Ash as Pozzolanic Material”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 15, pp. 48-53, 2003.

[19] N. Makaratat, C. Jaturapitakkul, and T. Laosamathikul, “Effect of Calcium Carbide Residue-Fly Ash Binder on Mechanical Properties of Concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 22, No. 11, pp. 1164-1170, 2010.

[20] *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM Standard C618, 2012.

[21] *Standard Specification for Portland Cement*, ASTM Standard C150/150M, 2012.

[22] W.E. Touma, D.F. Fowler, and R.L. Carrasquillo, “Alkali-Silica Reaction in Portland Cement Concrete: Testing Methods and Mitigation Alternatives”, Research Report ICAR 301-1F, *International Center for Aggregate Research*, 520 p, 2001.

[23] D. Stark, B. Morgan, P. Okamoto, and S. Diamond, “Eliminating or Minimizing Alkali-Silica Reactivity”, *Strategic Highway Research Program*, No. SHRP-C-343, 1993,.

[24] W. Phatanasirrat, “Corrosion Due to Municipal Wastewater on Compressive Strength of Fly Ash-Cement Mortar”, M.S. thesis, Dept. Civil Eng, King Mongkut’s Univ. of Tech. Thonburi, Thailand, 2001. [In Thai]

[25] D. Kooratanaweich, “Effect of Fly Ashes from 5 Sources on Water Permeability of Concrete”, M.S. thesis, Dept. Civil Eng, King Mongkut’s Univ. of Tech. Thonburi, Thailand, 2003. [In Thai]

- [26] W. Sarajun, "Effect of Rice Husk-Bark Ash and Palm Oil Fuel Ash on Water Permeability of Concrete", M.S. thesis, Dept. Civil Eng, King Mongkut's Univ. of Tech. Thonburi, Thailand, 2006. [In Thai]
- [27] C. Eakpanich, "A Study of Sulfuric Acid Attack on Mortar Containing Pozzolan", M.S. thesis, Dept. Civil Eng, King Mongkut's Univ. of Tech. Thonburi, Thailand, 2002. [In Thai]
- [28] K., Kiattikomol, C., Jaturapitakkul, S., Songpiriyakij, and S., Chutubtim, "A Study of Ground Coarse Fly Ashes with Different Finenesses from Various Sources as Pozzolanic Materials", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 23, No. 4-5, pp. 335-343, 2001.
- [29] G.C., Isaia, A.L.G., Gastaldini, R., Moraes, "Physical and Pozzolanic Action of Mineral Additions on the Mechanical Strength of High Performance Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, pp. 69-76, 2003.
- [30] C. Sangsuwan, and S., Sujjavanich, "Effects of Moderate Calcium Oxide Fly Ash on Expansion of Mortar Bar Due To Thai Reactive Aggregates", *Engineering Journal*, Vol. 16, No. 3, pp. 101-107, 2012.
- [31] D.L. Hanks, and D.T. Young, "Accelerated Testing and Mitigation of the Alkali-Silica Reaction Using Low-Calcium Fly Ash", in *The 4th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, Supplementary Papers, Sydney, Australia, 1997, pp. 205-220.
- [32] R.F. Bleszynski, and M.A., Thomas, "Microstructural Studies of Alkali-Silica Reaction in Fly Ash Concrete Immersed in Alkaline Solutions", *Advanced Cement Based Materials*, pp. 66-78, 1998.
- [33] D., Johnston, V., Ramakrishnan, and P., Nunna, "Effect of Natural Pozzolan Addition on Expansions Caused by Alkali-Silica Reaction", *Transportation Research Record 1458*, pp.118-128, 1997.
- [34] S., Kakodkar, V., Ramakrishnan, and L., Zimmerman, "Addition of Class C Fly Ash to Control Expansions Due to Alkali-Silica Reaction", *Transportation Research Record 1458*, pp. 109-117, 1997.
- [35] I., García-Lodeiro, A., Palomo, and A., Fernández-Jiménez, "Alkali-Aggregate Reaction in Activated Fly Ash Systems", *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 2, pp. 175-183, 2007.
- [36] A., Boddy, R., Hooton, and M., Thomas, "The Effect of the Silica Content of Silica Fume on Its Ability to Control Alkali-Silica Reaction", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 8, pp. 1263-1268, 2003.
- [37] H.M., Khater, "Effect of silica fume on the characterization of the geopolymer materials", *International Journal of Advanced Structural Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 5-12, 2013.
- [38] P., Chindaprasirt, C., Jaturapitakkul, W., Chalee, and U., Rattanasak, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers", *Waste Management*, Vol. 29, pp. 539-543, 2009.
- [39] R., Zerbino, G., Giaccio, and S., Marfil, "Evaluation of alkali-silica reaction in concretes with natural rice husk ash using optical microscopy", *Construction and Building Materials*, Vol. 71, pp. 132-140, 2014.
- [40] T., Arahori, and T., Suzuki, "Transformation of tridymite to cristobalite below 1470° C in silica refractories", *Journal of Materials Science*, Vol. 22, No. 6, pp. 2248-2252, 1987.