

ผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาของมอร์ตาร์

สุวัฒน์ रामจันทร์^{1*} วีระชาติ ตั้งจิรภัทร² และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล³

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

บทความนี้รายงานผลการศึกษาผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาในมอร์ตาร์ โดยบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีอนุภาคต่างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 33±1 และ 5±1 โดยน้ำหนัก แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเพื่อทดสอบปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาของมอร์ตาร์ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดที่ 1 ต่อ 2.25 โดยน้ำหนัก ซึ่งมวลรวมที่ใช้เป็นมวลรวมที่ไวต่อการทำปฏิกิริยา และควบคุมค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.47 เมื่อหลอมมอร์ตาร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงบ่มแท่งมอร์ตาร์ในน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และแช่แท่งมอร์ตาร์ต่อในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 1 N ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน จากการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันทั้งที่มีความละเอียดต่ำ และความละเอียดสูงสามารถลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาได้ นอกจากนี้การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันทั้งสองความละเอียดในปริมาณที่สูงขึ้น สามารถลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาได้มากขึ้น

คำสำคัญ : การขยายตัว / ความละเอียด/ เถ้าปาล์มน้ำมัน/ ปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา

* Corresponding Author : tience14@hotmail.com

1 นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

2 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

3 ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

Effect of Palm Oil Fuel Ash on Alkali-Silica Reaction of Mortar

Suwat Ramjan^{1*}, Weerachart Tangchirapat² and Chai Jaturapitakkul³

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140

Abstract

This research aimed to study the effect of palm oil fuel ash (POFA) on the alkali-silica reaction of mortar. POFA was ground until the particles were retained on a sieve No. 325 by 33±1 and 5±1% by weight. Ground POFA was then used to replace Portland cement type I at 10, 20, 30 or 40% by weight of binder to investigate the alkali-silica reaction of mortar. The ratio by weight between binder to fine aggregate of 1 to 2.25 was used; a highly reactive aggregate was also used to cast a mortar. A constant water to binder (w/b) ratio of 0.47 was used for all mortar mixtures. After casting for 24 h, mortar bars were cured in water at 80°C for a period of 24 h. The bars were then immersed in 1 N of sodium hydroxide (NaOH) solution at 80°C for a period of 28 days. The results showed that POFA of both high and low finenesses, which were used to replace Portland cement, could reduce the alkali-silica reaction in mortars. Moreover, using a higher amount of POFA, either with high and low finenesses, could reduce more expansion of mortars due to the alkali-silica reaction.

Keywords : Expansion / Fineness / Palm Oil Fuel Ash / Alkali-Silica Reaction

* Corresponding Author : tience14@hotmail.com

¹ Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

³ Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

ปัญหาการแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-มวลรวม (alkali-aggregate Reaction) เป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดความเสียหายซึ่งพบมากที่สุดปัญหาที่เกิดจากต่างและซิลิกาในมวลรวม ผลกระทบจากปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวในลักษณะคล้ายแผนที่ (map cracking) ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำลง และเกิดความเสียหายจากสาเหตุอื่นได้ง่ายขึ้น เช่น เกลือคลอไรด์หรือเกลือซัลเฟตในน้ำทะเลสามารถแทรกซึมเข้าไปภายในคอนกรีตทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้เร็วขึ้น

ถ้าปาล์มน้ำมัน ได้จากการนำทะเลลาย และเปลือกของปาล์มน้ำมันมาเผาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งในปี 2559 มีการพยากรณ์ว่าประเทศไทยจะสามารถผลิตปาล์มน้ำมันประมาณ 11.7 ล้านตัน [1] หลังจากผลิตน้ำมันปาล์ม แล้วจึงเผาซากที่เหลือได้เป็นถ้าปาล์มน้ำมันประมาณ 3 แสนตันหรือคิดเป็นร้อยละ 2.6 โดยน้ำหนักของปริมาณปาล์มน้ำมัน [2] ซึ่งถ้าปาล์มมีการนำไปใช้ในปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่กองทิ้ง โดยต้องเสียพื้นที่เพื่อกองทิ้งถ้าปาล์มน้ำมัน และยังส่งผลเสียทางด้านอากาศ เนื่องจากถ้าปาล์มน้ำมันสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย การใช้ถ้าปาล์มน้ำมันส่วนใหญ่มีเพียงในงานวิจัยเท่านั้น ซึ่งงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการใช้ถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ทำให้มอร์ตาร์หรือคอนกรีตสามารถให้ค่ากำลังอัดใกล้เคียง และสูงกว่าคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ควบคุมได้ อีกทั้งเพิ่มความคงทนต่อสารละลายซัลเฟตให้แก่คอนกรีตได้ [3-6]

วัสดุปอซโซลานสามารถใช้ลดผลกระทบจากการใช้มวลรวมที่ไวต่อการทำปฏิกิริยา (highly reactive aggregate) ที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาในคอนกรีตได้ โดย Shehata และ Thomas [7] พบว่าถ้าถ่านหินสามารถลดการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาได้ โดยการแทนที่ถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมต่ำและถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมสูงร้อยละ 20 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ ทำให้คอนกรีตมีการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาดำกว่าร้อยละ 0.05 ที่ 105 วัน จากนั้น Boddy และคณะ [8] พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมซิลิกาฟูมเพียงร้อยละ 4 โดยน้ำหนักวัสดุ

ประสาน มีการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา ลดลงเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมและการแทนที่ซิลิกาฟูมร้อยละ 12 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาได้ โดยมีการขยายตัวที่ต่ำกว่าร้อยละ 0.1 ที่ 14 วัน ต่อมา Zerbino และคณะ [9] พบว่าถ้าแกลบบดละเอียดร้อยละ 15 สามารถลดการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาของมอร์ตาร์ที่ใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยาช้า (slowly reactive aggregate) ได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุปอซโซลานหลายชนิด แต่ส่วนใหญ่ไม่ได้ศึกษาผลกระทบของความละเอียด สำหรับการศึกษผลกระทบของถ้าปาล์มน้ำมันต่อปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา Awal และ Hussin [10] ได้ใช้ถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่ามอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้นมีการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา ลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการใช้ถ้าปาล์มน้ำมันแทนปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงส่งผลต่อกำลังอัดที่ต่ำลง และไม่ได้ศึกษาผลกระทบของความละเอียดเช่นกัน อีกทั้งองค์ประกอบทางเคมีของถ้าปาล์มน้ำมันที่ศึกษาในประเทศมาเลเซียในอดีต อาจแตกต่างจากถ้าปาล์มน้ำมันในปัจจุบันของประเทศไทย เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้ปุ๋ยเคมีมากขึ้นในการเร่งการเจริญเติบโตของต้นปาล์มน้ำมัน ซึ่งอาจมีสารตกค้างและหลงเหลืออยู่ในถ้าปาล์มน้ำมัน ทำให้องค์ประกอบเคมีแตกต่างกันได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลกระทบของความละเอียด และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้าปาล์มน้ำมันต่อปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา

2. วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักในการศึกษา มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.14 ถ้าปาล์มน้ำมัน ได้จากโรงงานน้ำมันปาล์ม จังหวัดชุมพร ซึ่งถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้อยู่ในสถานะที่แห้ง จากนั้นนำถ้าปาล์มน้ำมันไปบดจนมีอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (45 ไมโครเมตร) ในช่วงร้อยละ 32-34 โดยน้ำหนัก (33POFA) โดยมีอนุภาคอยู่ในช่วงต่ำกว่าร้อยละ 34 ตาม ASTM C618 [11] ที่กำหนดสำหรับวัสดุปอซโซลาน และ

ในช่วงร้อยละ 4-6 โดยน้ำหนัก (5POFA) สำหรับ
 ถั่วปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูง ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้
 พบว่าถั่วปาล์มน้ำมันบด 33POFA และ 5POFA มี
 อนุภาคค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 33.7
 และ 5.2 ตามลำดับ และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.16
 และ 2.40 ตามลำดับ

มวลรวมละเอียดสำหรับทดสอบกำลังอัดของ
 มอร์ตาร์ใช้ทรายแม่น้ำ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.59

การดูดซึมน้ำร้อยละ 1.21 และใช้ขนาดที่ผ่านตะแกรง
 เบอร์ 30 และค้ำตะแกรงเบอร์ 100

มวลรวมละเอียดสำหรับทดสอบการขยายตัว
 เนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาของมอร์ตาร์ใช้หินปูน
 และนำมาย่อยให้มีขนาดคละตามตารางที่ 1 ซึ่งเป็นหินที่ไว
 ต่อการทำปฏิกิริยากับด่าง มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63
 และการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.83

ตารางที่ 1 ขนาดคละของหินที่ไวต่อการทำปฏิกิริยากับด่าง

ขนาดช่องเปิดของตะแกรง		มวล (%)
ผ่าน	ค้ำ	
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

ตารางที่ 2 แสดงส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบ
 กำลังอัด และการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา
 สำหรับมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบกำลังอัด ใช้อัตราส่วนวัสดุ
 ประสานต่อมวลรวมละเอียด (ทรายแม่น้ำ) เท่ากับ 1 ต่อ

2.75 โดยน้ำหนัก และใช้ถั่วปาล์มน้ำมันที่มีอนุภาคค้ำบน
 ตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 33 และ 5 แทนที่ปูนซีเมนต์
 ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก
 วัสดุประสาน โดยปรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ทำให้
 มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 110±5

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของมอร์ตาร์เพื่อทดสอบกำลังอัดและการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา

ตัวอย่าง	ส่วนผสม (โดยน้ำหนัก)			อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน*	ค่าการไหลแผ่ (%)
	ปูนซีเมนต์	เถ้าปาล์มน้ำมัน	มวลรวมละเอียด		
สำหรับทดสอบกำลังอัด					
CT	1.00	-	2.75	0.67	108
5POFA10	0.90	0.10	2.75	0.67	115
5POFA20	0.80	0.20		0.67	106
5POFA30	0.70	0.30		0.70	108
5POFA40	0.60	0.40		0.71	110
33POFA10	0.90	0.10	2.75	0.67	114
33POFA20	0.80	0.20		0.69	115
33POFA30	0.70	0.30		0.72	111
33POFA40	0.60	0.40		0.75	109
สำหรับทดสอบการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา					
CT	1.00	-	2.25	0.47	Not Apply
5POFA10	0.90	0.10	2.25	0.47	Not Apply
5POFA20	0.80	0.20			
5POFA30	0.70	0.30			
5POFA40	0.60	0.40			
33POFA10	0.90	0.10	2.25	0.47	Not Apply
33POFA20	0.80	0.20			
33POFA30	0.70	0.30			
33POFA40	0.60	0.40			

*อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานได้ชดเชยการดูดน้ำของมวลรวมแล้ว

สำหรับส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด (หินปูนย่อยที่ไวต่อปฏิกิริยา) เท่ากับ 1 ต่อ 2.25 โดยน้ำหนัก และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.47 ตามที่กำหนดโดย ASTM C1260 [12]

2.3 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 50 มม. หลังจากหล่อมอร์ตาร์ 24 ชม. จึงถอดแบบ แล้วนำ

มอร์ตาร์ไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัว ซึ่งการบ่มที่แตกต่างกันมีผลกระทบต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ [13] เมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน นำมอร์ตาร์ 5 ตัวอย่างต่อหนึ่งส่วนผสมมาทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด โดยให้น้ำหนักกดแก่มอร์ตาร์ในช่วง 90-180 กก/วินาที นำค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ทั้ง 5 ตัวอย่างมาเฉลี่ย ซึ่งค่ากำลังอัดของแต่ละตัวอย่างที่ได้ต้องไม่เกินร้อยละ 8.7 ของค่าเฉลี่ยตามที่กำหนดโดย ASTM C109 [14]

2.4 การทดสอบการขยายตัวของมอร์ตาร์เนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา

ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงปริซึมขนาด $25 \times 25 \times 285$ มม. หลังจากหล่อตัวอย่าง 24 ชม. จึงถอดแบบและนำตัวอย่างไปแช่ในน้ำที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นนำมาวัดความยาวเริ่มต้น แล้วนำมอร์ตาร์ไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มอลที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส วัดความยาวของแท่งมอร์ตาร์ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) จนถึง 28 วัน และใช้สมการที่ (1) ในการคำนวณการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ตาม ASTM C490 [15]

ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลง (L) หากมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 0.10 จัดว่าเป็นมวลรวมที่ไม่มีอันตราย หากมีการขยายตัวระหว่าง 0.10-0.20 จัดเป็นมวลรวมที่ทำให้ปฏิกิริยาได้ช้า และหากมีการขยายตัวเกินร้อยละ 0.20 จัดเป็นมวลรวมที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาตาม ASTM C1260 [12]

$$L = \frac{L_x - L_i}{G} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ L = ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลง (%), L_x = ค่าความยาวใดๆ (มม.), L_i = ค่าความยาวเริ่มต้น (มม.), และ G = ระยะความยาวระบุ (nominal gauge length) คือ 250 มม.

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 สมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide) เป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 65.4 และมีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide) ร้อยละ 20.9 นอกจากนี้องค์ประกอบของโซเดียม และโปแตสเซียมออกไซด์ (sodium and potassium oxide) ในปูนซีเมนต์ ซึ่งมีผลต่อปริมาณอัลคาไลเทียบเท่า (alkali content หรือ Na_2O_{eq}) ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา พบว่าปูนซีเมนต์นี้มีปริมาณอัลคาไลเทียบเท่าเท่ากับร้อยละ 0.6 ซึ่งจัดเป็นปูนซีเมนต์อัลคาไลต่ำตาม ASTM C150 [16] กำหนด

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์	เถ้าปาล์มน้ำมัน
Silicon Dioxide	20.9	45.0
Aluminum Oxide	4.8	1.0
Ferric Oxide	3.4	2.4
Calcium Oxide	65.4	12.7
Sulfur Trioxide	2.7	6.0
Magnesium Oxide	1.3	4.4
Sodium Oxide	0.3	0.6
Potassium Oxide	0.4	19.1
$Na_2O_{eq} = Na_2O + 0.658K_2O$	0.6	13.2
Loss On Ignition (LOI)	1.0	4.3

ถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีซิลิกอนไดออกไซด์ โปแตสเซียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักที่ร้อยละ 45, 19 และ 12 ตามลำดับ ถ้าปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบหลักของวัสดุพอลิซิลาน (silicon dioxide + aluminum oxide + ferric oxide) ร้อยละ 48.4 ซึ่งมีปริมาณต่ำกว่างานวิจัยที่ผ่านมาเล็กน้อยคือร้อยละ 56.9 ถึง 58.6 [17] อย่างไรก็ตามองค์ประกอบดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าที่ ASTM C618 [11] กำหนดไว้สำหรับ ถ้าถ่านหิน Class C คือไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 อีกทั้งมีปริมาณของซิลเฟอร์ไดออกไซด์สูงถึงร้อยละ 6 ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 3 ตามที่กำหนดโดย ASTM C618 [11] เมื่อพิจารณาทั้ง 2 องค์ประกอบ พบว่าถ้าปาล์มน้ำมันไม่ผ่านข้อกำหนดของ ASTM C618 [11] แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการใช้ถ้าปาล์มน้ำมัน สามารถให้กำลังอัดแก่คอนกรีตได้ใกล้เคียง หรือมากกว่าคอนกรีตควบคุมได้ อีกทั้งคอนกรีตมีความคงทนมากขึ้น [3, 4, 6, 18] สำหรับค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาของถ้าปาล์มน้ำมันอยู่ที่ร้อยละ 4.3 ซึ่งต่ำกว่าร้อยละ 6 ตามที่กำหนดโดย ASTM C618 [11] จากงานวิจัยในปี ค.ศ. 1997 ของ Awal และ Hussin [10] พบว่าถ้าปาล์มน้ำมันมีออกไซด์ของซิลิกา อลูมินาและเฟอร์ริครวมกันเท่ากับร้อยละ 59.7 ซึ่งสูงกว่าถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีซิลเฟอร์ไดออกไซด์ร้อยละ 2.8 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาร้อยละ 18 ซึ่งมีค่าสูงกว่าถ้าปาล์มน้ำมันในงานวิจัยนี้ และยิ่งสูงกว่าร้อยละ 6 ตามที่กำหนดโดย ASTM C618 [11] เนื่องจากในอดีตเทคโนโลยีในการเผา ยังไม่ดีมากนัก ดังนั้นจึงมีอุณหภูมิในการเผาที่ต่ำ ส่งผล

ให้ถ้าปาล์มน้ำมันมีส่วนของผลปาล์ม และกะลาปาล์มที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ปะปนอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาที่สูง เนื่องจากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาใช้อุณหภูมิที่ 750 ± 50 องศาเซลเซียสในการทดสอบ

นอกจากนี้พบว่าถ้าปาล์มน้ำมันมีปริมาณโปแตสเซียมออกไซด์ที่สูง อาจเกิดจากในปัจจุบันเกษตรกรได้ใช้ปุ๋ยเคมีที่มีโปแตสเซียมเป็นส่วนประกอบหลักแก่ต้นปาล์มน้ำมัน หลังจากเผาได้ถ้าปาล์มน้ำมันมาแล้วก็ยังมีโปแตสเซียมดังกล่าวตกค้างอยู่ในถ้าปาล์มน้ำมัน ทำให้ถ้าปาล์มน้ำมันมีปริมาณอัลคาไลเทียบเท่า ($\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$) ถึงร้อยละ 13.2 ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 3 ตามงานวิจัยของ Glauz และคณะ [19] ที่แนะนำสำหรับวัสดุพอลิซิลานที่ใช้ลดผลกระทบจากการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Awal และ Hussin [10] พบว่าถ้าปาล์มน้ำมันที่มีปริมาณอัลคาไลร้อยละ 2.69 สามารถลดการขยายตัวของคอนกรีตจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาได้

3.2 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์

ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ควบคุม (มอร์ตาร์ CT) และมอร์ตาร์ที่ผสมถ้าปาล์มน้ำมันทั้งสองความละเอียดสำหรับทดสอบกำลังอัดแสดงในตารางที่ 4 พบว่ามอร์ตาร์ควบคุมใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.67 และมีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 110 ± 5 ซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของมอร์ตาร์ควบคุมดังกล่าวใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาคืออยู่ในช่วง 0.61-0.68 [20-23]

ตารางที่ 4 กำลังอัดของมอร์ตาร์

ตัวอย่าง	กำลังอัดของมอร์ตาร์ (กก/ซม ²) (กำลังอัดเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม, %)			
	7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
CT	228 (100)	294 (100)	322 (100)	335 (100)
5POFA10	211 (93)	275 (94)	309 (96)	326 (97)
5POFA20	188 (83)	257 (87)	282 (88)	297 (89)
5POFA30	171 (75)	237 (81)	260 (81)	276 (82)
5POFA40	119 (52)	177 (60)	192 (60)	204 (61)
33POFA10	176 (77)	229 (78)	264 (82)	276 (82)
33POFA20	148 (65)	199 (68)	224 (69)	243 (73)
33POFA30	123 (54)	167 (57)	197 (61)	210 (63)
33POFA40	91 (40)	125 (42)	162 (50)	175 (52)

สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้งสองความละเอียดในปริมาณที่สูงขึ้น ใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้นเพื่อให้มีค่าการไหลแผ่ในช่วง 110 ± 5 หรือใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่มีค่าการไหลแผ่ที่ต่ำกว่าเล็กน้อย (ในกรณีของมอร์ตาร์ 5POFA10 และ 5POFA20) เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันมีรูปร่างที่กลมสลับกับขรุขระ และมีความพรุนเล็กน้อย [3] เช่นมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (มอร์ตาร์ 5POFA) ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับมอร์ตาร์ควบคุม เนื่องจากอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ จึงทำให้ไหลได้ดี (5POFA10) สำหรับมอร์ตาร์ 33POFA10 สามารถไหลแผ่ได้ดีเช่นกัน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับมอร์ตาร์ควบคุมได้ เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 33POFA ร้อยละ 10 ไม่ส่งผลต่อการไหลแผ่มากนัก

มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงขึ้นไป ทำให้มอร์ตาร์ไหลแผ่ได้ดีขึ้น และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดที่ต่ำกว่า ซึ่งการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันทั้งสองความละเอียดร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีผลกระทบต่อค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้นจะเห็นผลของความละเอียดต่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มี

ค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงเดียวกันได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น มอร์ตาร์ 5POFA20 กับมอร์ตาร์ 33POFA20 และมอร์ตาร์ 5POFA40 กับ มอร์ตาร์ 33POFA40 ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างกันเท่ากับ 0.02 และ 0.04 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเทียบกับข้อกำหนดของ ASTM 618 [11] สำหรับเถ้าถ่านหิน Class F ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากการเผาเช่นเดียวกับเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 105 เทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม เมื่อใช้วัสดุปอโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่ามอร์ตาร์ 5POFA20 และ 33POFA20 ยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.70

สำหรับส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาได้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.47 และไม่พิจารณาค่าการไหลแผ่

3.3 กำลังอัดของมอร์ตาร์

กำลังอัดของมอร์ตาร์แสดงในตารางที่ 4 พบว่ามอร์ตาร์ควบคุมมีกำลังอัดเท่ากับ 228 กก/ซม² ที่อายุ 7 วัน และพัฒนากำลังอัดไปถึง 335 กก/ซม² ที่อายุ 90 วัน ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมจากงานวิจัยที่ผ่านมา [20-23]

ที่มีกำลังอัดเท่ากับ 269-290 กก/ซม² ที่อายุ 7 วัน และ 369-467 กก/ซม² ที่อายุ 90 วัน เนื่องจากมอร์ตาร์ควบคุมในงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงกว่า และใช้ทรายละเอียดที่มีโมดูลัสความละเอียดที่ต่ำกว่า จึงส่งผลให้มีกำลังอัดที่ต่ำกว่า

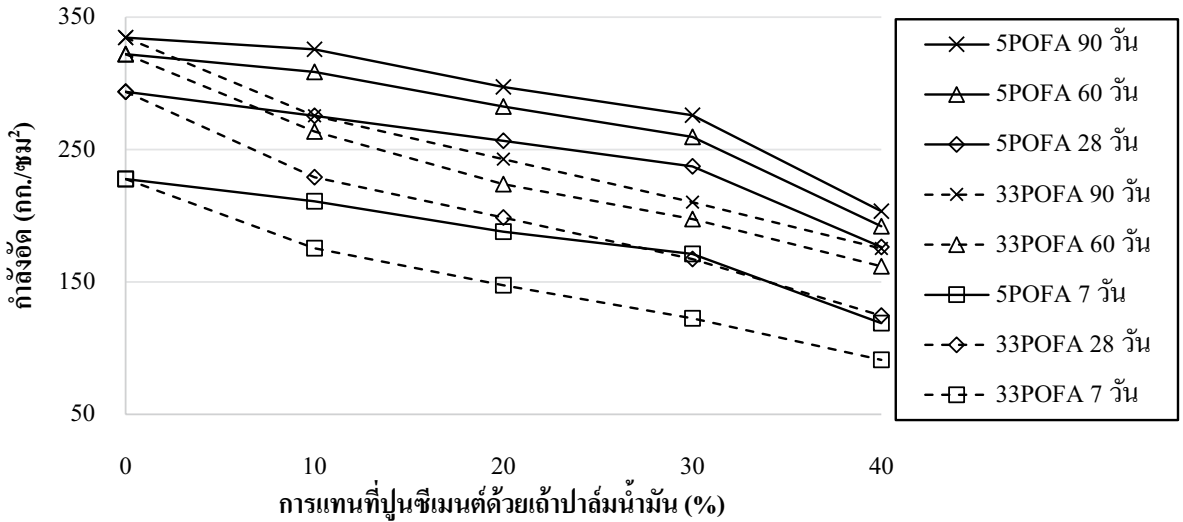
สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมทุกอายุการทดสอบ และมีกำลังอัดลดลงเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้น ตัวอย่างเช่น มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (5POFA) ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 275, 257, 237 และ 177 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 94, 87, 81 และ 60 ของมอร์ตาร์ควบคุมตามลำดับ

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันส่งผลให้ปริมาณ C₃S, C₂S, C₃A และ C₄AF ในปูนซีเมนต์ลดลง และลดลงมากขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันที่มากขึ้น ซึ่งสารดังกล่าวเป็นสารตั้งต้นที่ให้กำลัง และทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไปทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าปาล์มน้ำมันได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเป็นสารประกอบที่ให้กำลังอัดเป็นหลัก แต่ทว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ และอลูมิเนียมออกไซด์ไม่สูงมาก (ร้อยละ 46.0) จึงทำให้ได้ผลผลิตของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตจากปฏิกิริยาปอซโซลานไม่สูงมาก ทำให้กำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานลดลงตามไปด้วย แม้ว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีโปแตสเซียมที่ช่วยเพิ่มความเป็นด่างให้แก่ซีเมนต์อยู่ร้อยละ 19.1 ก็ไม่สามารถชดเชยกำลังอัดของมอร์ตาร์ได้ อย่างไรก็ตามมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถให้ค่าดัชนีกำลังสูงกว่าร้อยละ 75 ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตาม ASTM C618 [11] กำหนดได้

สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (5POFA) ร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำ (33POFA) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถให้กำลังอัดได้สูงกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุมทุกอายุการทดสอบ นอกจากนั้นมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์ม

น้ำมันบดละเอียดร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถให้กำลังอัดได้ถึงร้อยละ 97 ของมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 90 วัน ซึ่งกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในงานวิจัยนี้ต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในงานวิจัยที่ผ่านมา [5] เล็กน้อย คือ มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (อนุภาคค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 4.3) ร้อยละ 10-40 มีกำลังอัดเป็นร้อยละ 103-105 ของมอร์ตาร์ควบคุม และมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำ (อนุภาคค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 34.8) ร้อยละ 10-40 มีกำลังอัดอยู่ในช่วงร้อยละ 60-88 ของมอร์ตาร์ควบคุม จากผลกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำ (33POFA) จึงไม่เหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน เนื่องจากมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (มอร์ตาร์ 33POFA20) มีดัชนีกำลังต่ำกว่าร้อยละ 75 ทุกอายุการทดสอบ

ความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันมีผลกระทบต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์อย่างมาก โดยรูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน กับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่าเส้นความสัมพันธ์ของกำลังอัดของมอร์ตาร์และปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันบดทั้งสองความละเอียดมีลักษณะต่างกันอย่างชัดเจน กล่าวคือมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเส้นค่อนข้างตรง แต่เมื่อมากกว่าร้อยละ 40 กำลังอัดตกลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของสำเริญ และปริญญา [24] ขณะที่มอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดหยาบมีกำลังอัดที่ตกลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อแทนที่เพียงร้อยละ 10 ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดเล็กมีความพรุนน้อย และขนาดของรูพรุนเล็ก ทำให้อุดช่องว่างได้ดีขึ้น และทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและเร็วขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ [25] ที่ใช้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดต่างกันแทนที่ปูนซีเมนต์ และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Montakarntiwong และคณะ [26] ที่ศึกษาการใช้เถ้าขานอ้อยที่มีความละเอียดต่างกัน



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน กับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยน้ำมันปาล์ม






3.4 การขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาของมอร์ตาร์

ตารางที่ 5 แสดงค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์เนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา พบว่ามอร์ตาร์ควบคุม (CT) มีการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาเท่ากับร้อยละ 0.2336 และ 0.3831 เมื่อทดสอบที่ 14 และ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งที่อายุ 14 วัน มอร์ตาร์ควบคุมมีการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาสูงกว่า

ร้อยละ 0.2 ทั้งที่เป็นปูนซีเมนต์อัลคาไลต่ำ แต่ใช้มวลรวมที่ไวต่อการทำปฏิกิริยา แม้ว่ามอร์ตาร์ควบคุม (CT) มีการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาสูง แต่ไม่เห็นรอยแตกร้าวของแท่งมอร์ตาร์อย่างเด่นชัดดังแสดงในรูปที่ 2 (CT) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาภาพถ่ายขยายในรูปที่ 3 พบว่าบริเวณผิวของมอร์ตาร์ควบคุม (CT) มีไฮเดียมไฮดรอกไซด์เกาะอยู่บริเวณริมของรูพรุน และมีรอยแตกร้าวในแนวยาวขนาดความกว้างเล็กกว่า 0.2 มม.

ตารางที่ 5 การขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาของมอร์ตาร์

ตัวอย่าง	การขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาของมอร์ตาร์ (%)	
	14 วัน	28 วัน
CT	0.2336	0.3831
5POFA10	0.1380	0.3489
5POFA20	0.1325	0.2858
5POFA30	0.1111	0.2435
5POFA40	0.0644	0.1496
33POFA10	0.1417	0.3400
33POFA20	0.1221	0.2785
33POFA30	0.0994	0.2446
33POFA40	0.0391	0.1203

	CT
	5POFA10
	5POFA40
	33POFA10
	33POFA40

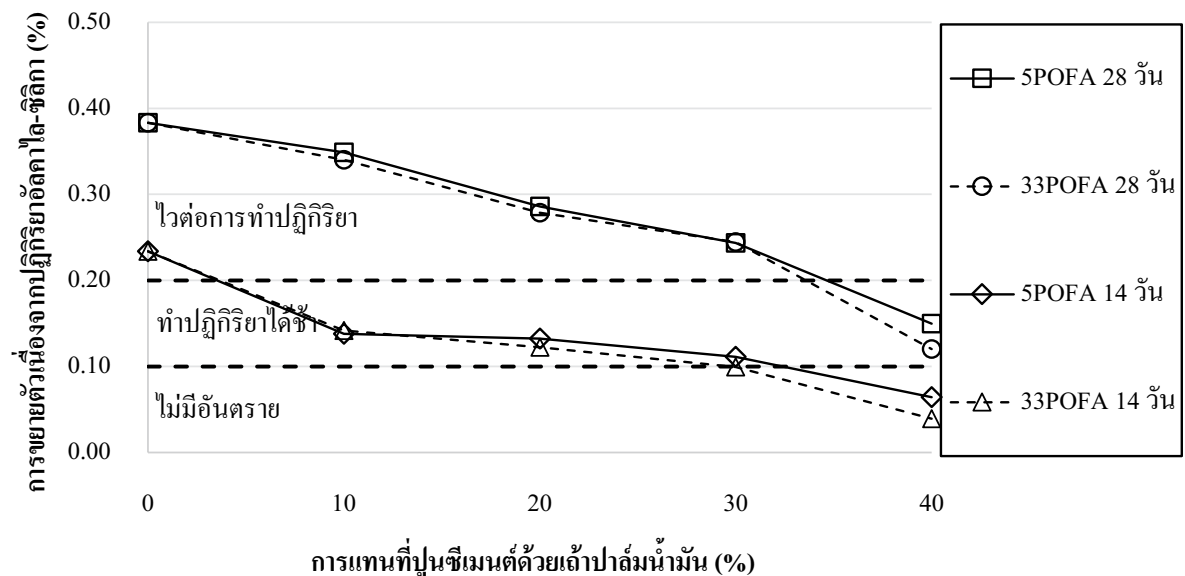
รูปที่ 2 ลักษณะผิวของมอร์ตาร์หลังแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน



รูปที่ 3 ภาพถ่ายขยายลักษณะผิวของมอร์ตาร์ควบคุม (CT) หลังแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน มีรอยแตกร้าวขนาดเล็ก และมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เกาะอยู่บริเวณรูพรุน

มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (5POFA) ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่าการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาในช่วงร้อยละ 0.1380-0.0644 และ 0.3489-0.1496 ที่เวลาทดสอบ 14 และ 28 วัน ตามลำดับ สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำ (33POFA) ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่าการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาในช่วงร้อยละ 0.1417-0.0391 และ 0.3400-0.1203 ที่เวลาทดสอบ 14 และ 28 วัน ตามลำดับ โดยรูปที่ 2 ได้แสดงให้เห็นลักษณะผิวของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้งสองความละเอียดร้อยละ 10 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ไม่มีรอยแตกบริเวณผิว เพราะการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกามีค่าต่ำ

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาของมอร์ตาร์ที่อายุ 14 และ 28 วันกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันทั้งสองความละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ ทำให้มอร์ตาร์มีการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาลดลง และลดลงมากขึ้นตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่แทนที่ปูนซีเมนต์สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Awal และ Hussin [10] ที่พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (พื้นที่ผิวเท่ากับ 519 ม²/กก) แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม และการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 50 สามารถลดการขยายตัวให้ต่ำกว่าร้อยละ 0.1 ที่ 14 วัน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาของมอร์ตาร์ที่อายุ 14 และ 28 วันกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน

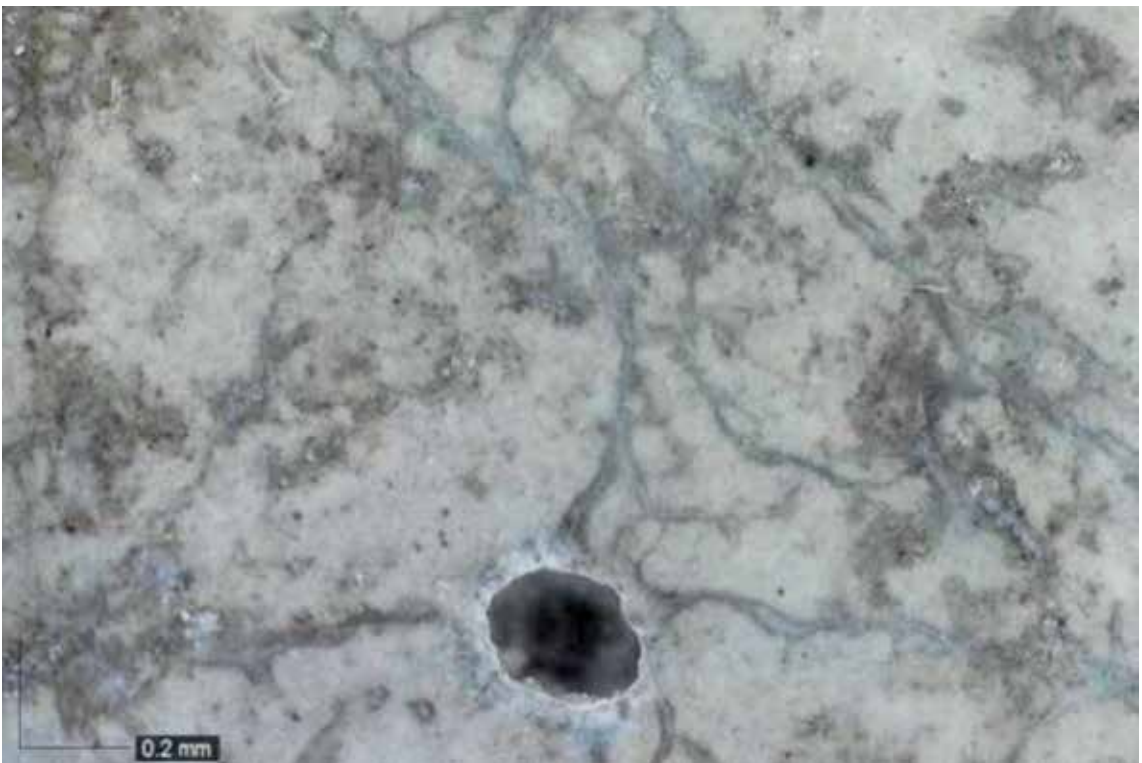
สำหรับงานวิจัยนี้การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันทั้งสองความละเอียดร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถลดการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาของมอร์ตาร์ที่ 14 วันให้ต่ำกว่าร้อยละ 0.1 เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์ในปูนซีเมนต์ลดลง ทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง และแคลเซียมไฮดรอกไซด์

บางส่วนสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับซิลิกาและอลูมินาในเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน คือแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกต ไฮเดรต ซึ่งมีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบหลัก และแคลเซียมสามารถละลายออกมาส่งผลต่อซิลิกาเจล ถึงแม้ว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีปริมาณแคลเซียม

ออกไซด์และโปแตสเซียมออกไซด์สูง หรือปริมาณอัลคาไลสูง แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาเท่ากับปริมาณปูนซีเมนต์ในวัสดุประสาน นอกจากนี้ถ้าปาล์มน้ำมันขนาดเล็กยังไปอุดช่องว่างภายในมอร์ตาร์ทำให้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากการทดสอบซึมเข้าไปกระตุ้นซิลิกาในมวลรวมให้ทำปฏิกิริยากับต่างได้ยากขึ้น เช่นเดียวกับแก้วานหินที่มีความละเอียดสูงสามารถอุดช่องว่างได้ดีในงานวิจัยของ Shehata และ Thomas [7] ทำให้คอนกรีตที่ผสมแก้วานหิน Class F ร้อยละ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถลดการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาให้ต่ำกว่าร้อยละ 0.1 ได้ นอกจากนี้ความละเอียดของวัสดุประสานสามารถทำให้ตัวอย่างมีความทึบน้ำสูงขึ้น ส่งผลให้ความทนทานต่อสถานะต่างๆ ได้ดี เช่น สถานะที่มีคลอไรด์หรือซัลเฟต [27]

เมื่อพิจารณาผลของความละเอียดของแก้วปาล์มน้ำมันต่อการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาในรูปที่ 2 พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมแก้วปาล์มน้ำมันทั้งสองความละเอียดมีการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่ใกล้เคียงกัน โดยมอร์ตาร์ที่ผสมแก้วปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำมีการขยายตัวที่ต่ำกว่าเล็กน้อย และเห็นได้ชัดที่การแทนที่แก้วปาล์มน้ำมันร้อยละ 40

รูปที่ 5 เป็นภาพถ่ายขยายลักษณะผิวหน้าของมอร์ตาร์ 5POFA10 หลังจากทดสอบปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาเป็นเวลา 28 วัน พบว่ามีโซเดียมไฮดรอกไซด์ลักษณะสีขาวเกาะอยู่บริเวณรูพรุน และผิวของมอร์ตาร์นอกจากนั้นมอร์ตาร์ 5POFA40 มีโซเดียมไฮดรอกไซด์เกาะอยู่บริเวณผิวมากกว่ามอร์ตาร์ 5POFA10 เนื่องจากไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปภายในได้ และมีรอยแตกร้าวขนาดเล็กมาก ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 5 ภาพถ่ายขยายลักษณะผิวของมอร์ตาร์ที่ผสมแก้วปาล์มน้ำมัน (5POFA10) หลังแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 28 วัน ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน มีโซเดียมไฮดรอกไซด์เกาะอยู่บริเวณรูพรุน



รูปที่ 6 ภาพถ่ายขยายลักษณะผิวของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (5POFA40) หลังแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 28 วัน ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน มีรอยแตกร้าวขนาดเล็กมาก

4. สรุป

1. เมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่างกัน แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณเท่ากัน พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูง ทำให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มที่มีความละเอียดต่ำกว่า และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่มากขึ้น

2. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถลดการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาให้อยู่ในช่วงร้อยละ 0.1-0.2 ที่ 14 วันได้ และการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาต่ำกว่าร้อยละ 0.1 เมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูง และความละเอียดต่ำร้อยละ 40 และ 30-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

3. ความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมัน (ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ระหว่างร้อยละ 5 ถึง 34 โดยน้ำหนัก) มีผลต่อการลดการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาเหมือนกัน แต่ความละเอียดมีผลกระทบต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์เป็นอย่างมาก

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ โครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU) มจร. ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์ทุนการทำวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการทุนวิจัยและวิชาการตามแผนและกลยุทธ์เพื่อการพัฒนา (สัญญาเลขที่ CE-KMUTT 5903)

6. เอกสารอ้างอิง

1. Centre for Agricultural Information, 2015,

Palm Production, Office of Agricultural Economics, Thailand : Ministry of Agriculture and Cooperatives.

2. Charoennatkul, C., 2014, "Interlocking Blocks Containing Oil Palm Ash and Shells Waste," *Journal of Community Development and Life Quality*.

3. Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Tangchirapat, W. and Saeting, T., 2007, "Evaluation of the Sulfate Resistance of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash," *Construction and Building Materials*, 21 (7), pp. 1399-1405.

4. Tangchirapat, W., Saeting, T., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K. and Siripanichgorn, A., 2007, "Use of Waste Ash from Palm Oil Industry in Concrete," *Waste Management*, 27 (1), pp. 81-88.

5. Jaturapitakkul, C., Tangpagasit, J., Songmue, S. and Kiattikomol, K., 2011, "Filler Effect and Pozzolanic Reaction of Ground Palm Oil Fuel Ash," *Construction and Building Materials*, 25 (11), pp. 4287-4293.

6. Kroehong, W., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C. and Chindaprasirt, P., 2011, "Effect of Palm Oil Fuel Ash Fineness on the Microstructure of Blended Cement Paste," *Construction and Building Materials*, 25 (11), pp. 4095-4104.

7. Shehata, M.H. and Thomas, M.D.A., 2000, "The Effect of Fly Ash Composition on the Expansion of Concrete due to Alkali-silica Reaction," *Cement and Concrete Research*, 30 (7), pp. 1063-1072.

8. Boddy, A.M, Hooton, R.D. and Thomas, M.D.A., 2003, "The Effect of the Silica Content of Silica Fume on its Ability to Control Alkali-silica Reaction," *Cement and Concrete Research*, 33 (8), pp. 1263-1268.

9. Zerbino, R., Giaccio, G., Batic, O.R. and Isaia, G.C., 2012, "Alkali-silica Reaction in Mortars and Concretes Incorporating Natural Rice Husk Ash," *Construction and Building Materials*, 36, pp. 796-806.

10. Awal, A.S.M Abdul and Hussin, M.W., 1997, "The Effectiveness of Palm oil Fuel Ash in Preventing Expansion due to Alkali-silica Reaction," *Cement and Concrete Composites*, 19 (4), pp. 367-372.

11. ASTM Standard C618, 2012, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2012, DOI: 10.1520/C0618-12a, www.astm.org.

12. ASTM Standard C1260, 2014, "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)," *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2014, DOI: 10.1520/C1260-14, www.astm.org.

13. Srichan, T., Chatveera, B., Choktaweekarn, P. and Tangtermsirikul, S., 2011, "A study on curing sensitivity of concrete with different cement types and mineral admixtures," *KMUTT Research and Development Journal*, 34 (4), pp. 383-394.

14. ASTM Standard C109/C109M, 2013, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)," *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2013, DOI: 10.1520/C0109__C0109M-13, www.astm.org.

15. ASTM Standard C490/C490M, 2011, "Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete", *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2011, DOI: 10.1520/C0490__C0490M-11E01, www.astm.org.

16. ASTM Standard C150/150M, 2012, "Standard Specification for Portland Cement", *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2012, DOI: 10.1520/C0150__C0150M-12, www.astm.org.

17. Kroehong, W., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C.

and Chindaprasirt, P., 2012, "A Study Microstructure of Blended Cement Paste Containing Palm Oil Fuel Ash," *KMUTT Research and Development Journal*, 35 (2), pp. 187-200.

18. Kroehong, W., Sinsiri, T. and Jaturapitakkul, C., 2011, "Effect of Palm Oil Fuel Ash Fineness on Packing Effect and Pozzolanic Reaction of Blended Cement Paste," *Procedia Engineering*, 4, pp. 361-369.

19. Glauz, D.L., Roberts, D., Jain, V., Moussavi, H., Llewellyn, R. and Lenz, V., 1996, "Evaluate the Use of Mineral Admixtures in Concrete to Mitigate Alkali-silica Reaction," *Report FHWA/CA/OR-97-01, Office of Materials Engineering and Testing Service, California Department of Transport.*

20. Wongpa, J., 2003, Use of Rice Husk-Bark Ashes As a Pozzolan, Master of Science Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

21. Likhitsripaiboon, N., 2005, Development of Bagasse Ashes as a Pozzolanic Material, Master of Science Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

22. Khaewsribut, N., 2014, A Study of Properties of Bagasse Ash from Various Sources for use in Concrete, Master of Science Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

23. Chatveera, B. and Srinourn, P., 2012, "A

Study of Properties of Mortar Portland Cement Type V Mixed with Ground Rice Husk Ash and Limestone Powder," *KMUTT Research and Development Journal*, 35 (2), pp. 201-218.

24. Rukzon, S. and Chindaprasirt, P., 2008, "Strength and Chloride Penetration of Mortar with Mixture Proportioning in Ternary Cementitious System," *KMUTT Research and Development Journal*, 31 (4), pp. 859-869.

25. Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Sinsiri, T., 2005, "Effect of Fly Ash Fineness on Compressive Strength and Pore Size of Blended Cement Paste," *Cement and Concrete Composites*, 27 (4), pp. 425-428.

26. Montakarntiwong, K., Chusilp, N., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2013, "Strength and Heat Evolution of Concretes Containing Bagasse Ash from Thermal Power Plants in Sugar Industry," *Materials and Design*, 49, pp. 414-420.

27. Jidrada, P., Chatveera, B. and Makul, N., 2012, "Effect of Combined Coal-biomass Ash on the Chloride Penetration Resistance of Mortar Cement : A Case Study of Different Anthracite, Bituminous, Rice Husk and Eucalyptus Ash Exposed to Synthetic Seawater," *KMUTT Research and Development Journal*, 35 (4), pp. 485-499.