

กำลังของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราจากอุตสาหกรรม The Strength of Cement Mortar with Industrial Rubberwood Fly Ash

ทวีศักดิ์ ทองขวัญ¹ จุฑามาศ ลักษณะกิจ^{1*} นันทชัย ชูศิลป์¹ วิศิษฐ์ศักดิ์ ทับยัง¹ อรุณ ลูกจันทร์¹
พงศ์ศักดิ์ ศุขมณี¹ อาศิร อัยรักษ์¹ ถาวร เกื้อสกุล¹ และเปรมณัช ชุมพร้อม¹

Thaweesak Thongkhwan¹ Chuthamat Laksanakit^{1*} Nuntachai Chusilp¹ Wisitsak Tabyang¹
Arun Lukjan¹ Pongsak Sookmanee¹ Arsit Iyaruk¹ Tavorn Kuasakul¹ and
Premmanat Chumprom¹

Received: October 30, 2023; Revised: February 29, 2024; Accepted: March 6, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราจากอุตสาหกรรม โดยใช้เถ้าลอยไม้ยางพาราแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (GU) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC) ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลเท่ากับ 110 ± 5 ทำการทดสอบกำลังอัด กำลังดัด และกำลังดึง จากผลการวิจัยพบว่า (1) กำลังอัดของมอร์ตาร์ มีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราที่เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU สามารถใช้เถ้าลอยไม้ยางพาราได้ถึงร้อยละ 20 ส่วนมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC สามารถใช้เถ้าลอยไม้ยางพาราได้ถึงร้อยละ 10 (2) กำลังดัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 10 สามารถรับกำลังดัดได้สูงกว่ามอร์ตาร์ส่วนผสมควบคุม และ (3) กำลังดึงของมอร์ตาร์มีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราที่เพิ่มมากขึ้น สรุปได้ว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งสามารถต่อยอดและพัฒนาในการใช้ประโยชน์ต่อไปได้

คำสำคัญ : เถ้าลอยไม้ยางพารา; มอร์ตาร์; กำลังอัด; กำลังดัด; กำลังดึง

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding Author, Tel. 08 9757 4263, E - mail: chuthamat.l@rmutsv.ac.th

Abstract

The objective of this research is to study the strength of cement mortars mixed with industrial rubberwood fly ash. The rubberwood fly ash was used as a replacement for general-purpose hydraulic cement (GU) and Portland cement type 1 (PC) in proportions of 0, 10, 20, and 30 percent by weight of the binder. The water-to-cement ratio was varied to achieve a flow consistency of 110 ± 5 . Compressive strength, flexural strength, and tensile strength were then tested. The results of the study indicated that (1) the compressive strength of mortars decreased with the increase of rubberwood fly ash content. However, GU mortar met with a percentage of replacement of 20 percent. For PC mortar, while, the appropriate replacement of 10 percent. (2) the mortars with 10 percent rubberwood fly ash showed higher compressive strength than the control mortars. And, (3) the tensile strength of mortars decreased with the increase of rubberwood fly ash content. In conclusion, the appropriate replacement level for cement with rubberwood fly ash was 10 percent which provided opportunities for future extensions and developments.

Keywords: Rubberwood Fly Ash; Mortar; Compressive Strength; Flexural Strength; Tensile Strength

บทนำ

เถ้าลอยไม้ยางพาราเป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง จากเศษไม้ ปีกไม้ ในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อกำจัด หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งผลจากกระบวนการเผาไหม้จะเกิดเป็นเถ้าจากไม้ยางพารา ทั้งเถ้าหนัก (Bottom Ash) และเถ้าลอย (Fly Ash) โดยเถ้าลอยมีลักษณะเป็นผงฝุ่น น้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย การลดการฟุ้งกระจายของฝุ่นมีการกำจัดโดยการนำไปทิ้งโดยวิธีการฝังกลบ แต่การกำจัดด้วยวิธีดังกล่าวส่งผลให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม เกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นละออง และส่งผลกระทบต่อสุขภาพทางเดินหายใจของผู้อยู่อาศัยบริเวณใกล้เคียง การกำจัดเถ้าลอยด้วยวิธีอื่นจึงอาจเป็นทางเลือกที่ดีกว่า อย่างเช่นการใช้เถ้าลอยไม้ยางพาราทดแทนบางส่วนของปูนซีเมนต์ [1] พบว่าเถ้าลอยไม้ยางพารามีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 41.19 ส่งผลต่อสมบัติด้านกำลังอัด ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งทั้งหมดมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายปูนซีเมนต์ และ [2] ยังพบอีกว่าความแข็งแรงของอิฐที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยไม้ยางพาราจะเกิดปฏิกิริยาสำคัญ 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ทำให้เกิดความแข็งแรง และปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งเกิดหลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดสารเชื่อมประสานขึ้น ส่งผลให้สามารถนำเถ้าลอยไม้ยางพารามาใช้งานได้ เพิ่มทางเลือกในการกำจัดเถ้าลอย และสร้างมูลค่ามากขึ้น เช่น [3] นำเถ้าไม้ยางพาราที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 4 ทดแทนบางส่วนในการผลิตบล็อกประสานปูพื้น [2] ศึกษาการใช้เถ้าลอยไม้ยางพาราเป็นส่วนผสมในอิฐ หรือ [4] ใช้เถ้าลอยไม้ยางพาราทดแทนบางส่วนสำหรับผลิตชิ้นส่วนโครงสร้างสำเร็จรูป ซึ่งเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อยอด แต่พบว่าการใช้เถ้าลอยมีสมบัติบางอย่างที่ต้องศึกษาก่อนใช้งานไม่ว่าจะเป็นอัตราการเกิดคาร์บอนขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ปัจจัยด้านความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์อุณหภูมิ ที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนขึ้น โดยความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 50 - 75 ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนขึ้นสูง [5] อีกทั้งอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในอัตราที่สูงจะทำให้เกิดคาร์บอนขึ้นได้เร็วขึ้น [6] รวมถึงขนาดความละเอียดของอนุภาคของเถ้าลอย โดยมาตรฐาน ASTM C 618 ได้กำหนดความละเอียดของวัสดุที่สามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ต้องมีสัดส่วนค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 34 เหมือนกับงานวิจัย [7] ที่ใช้เถ้าปาล์ม

น้ำมันบดละเอียด มีค่าร้อยละค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 9.4 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) เท่ากับ 9.2 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก เพราะฉะนั้นปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมจึงเป็นค่าแปรสำคัญในการศึกษา

การทดสอบสมบัติกำลังของมอร์ตาร์ที่ได้จากปูนซีเมนต์มีการทดแทนบางส่วนด้วยวัสดุชนิดต่าง ๆ เป็นข้อมูลบ่งชี้ถึงคุณภาพของวัสดุประสานดังกล่าวนั้น อาทิเช่น [8] พบว่าการใช้มอร์ตาร์มีแนวโน้ม กำลังอัด กำลังค้ำ และการไหลแผ่ลดลง ส่วนระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณเส้นใยแปรใช้ใหม่จากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และ [9] ผลกระทบของปริมาณเถ้าลอยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลต่าง ๆ การเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าลอยส่งผลให้กำลังค้ำ และกำลังอัดลดลง อีกทั้งผลของกำลังของมอร์ตาร์จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับกำลังของคอนกรีต โดยทั่วไปมาตรฐานของปูนซีเมนต์จะระบุถึงกำลังของมอร์ตาร์ โดยเฉพาะกำลังอัดว่าต้องมีกำลังอัดอย่างน้อยเท่ากับเท่าใดจึงถือว่าวัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ชนิดดังกล่าว และวัสดุทดแทนบางส่วนผสมอยู่นั้นมีคุณภาพตามที่กำหนดหรือไม่

ความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยจากไม้ยางพารามาทดแทนบางส่วนของปูนซีเมนต์ โดยการบ่งชี้คุณภาพของวัสดุโดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ ทดสอบสมบัติเชิงกล กำลังอัด กำลังค้ำ และกำลังค้ำ อ้างอิงจากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา จึงเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยในครั้งนี้ โดยใช้ตัวอย่างเถ้าลอยไม้ยางพาราที่ได้มาจากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ผลิตไฟฟ้าจากการเผาไม้ยางพาราในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ และปริมาณที่เหมาะสมในการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยจากไม้ยางพารา เพื่อต่อยอดในการใช้ประโยชน์ต่อไป

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

วัสดุที่ใช้สำหรับการวิจัย ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ 2 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (Hydraulic Cement - General Use: GU) ตามมาตรฐาน มอก. 2594-2556 [10] และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland Cement - Type I: PC) ตามมาตรฐาน มอก. 15-2562 [11] เป็นวัสดุประสานหลัก เถ้าลอยไม้ยางพารา (Rubberwood Fly Ash: RWA) จากการเผาไหม้ผลิตไฟฟ้า ในโรงไฟฟ้าชีวมวล พาเนล พลาสติก ไอโอ-พาเวอร์ อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดสงขลา พงมีลักษณะเป็นสีน้ำตาล และมีสัดส่วนค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 79.35 ทราบเมื่อน้ำค้ำขนาดที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งตามมาตรฐาน ASTM C778-00 [12] ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 30 ดังรูปที่ 1



(ก) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (GU)



(ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC)



(ค) เถ้าลอยไม้ยางพารา



(ง) ทราบเมื่อน้ำ

รูปที่ 1 วัสดุวิจัย

เตรียมตัวอย่างปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ผสมกับทราย 2.75 ส่วน โดยน้ำหนัก ผสมกับน้ำสะอาดที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหล (Flow) เท่ากับ 110 ± 5 ASTM C230/C230M-98 [13] ดำเนินการทั้งปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (GU) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC) กำหนดเป็นส่วนผสมควบคุม จากนั้นใช้เกล็ดยไม้ยางพาราแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ทั้ง 2 ชนิด ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนผสมทั้งหมดดังตารางที่ 1 ผสมตัวอย่างมอร์ตาร์ในแต่ละส่วนผสมตามมาตรฐาน ASTM C305-99 [14] หล่อตัวอย่างเพื่อทดสอบ กำลังอัด กำลังคด และกำลังดึง ดังรูปที่ 2

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ (Compressive Strength Test) โดยหล่อขึ้นรูปตัวอย่างขนาด $50 \times 50 \times 50$ mm จำนวน 3 ตัวอย่างต่อส่วนผสม จากนั้นปล่อยให้แห้ง 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวระยะเวลา 3 7 28 และ 60 วัน จากนั้นนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำ เช็ดให้แห้งด้วยผ้า วัดมิติของตัวอย่าง และทำการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์จนเกิดการวิบัติตามมาตรฐาน ASTM C109/C100M-99 [15] วิธีการดังรูปที่ 2

การทดสอบกำลังคดของมอร์ตาร์ (Flexural Strength) หรือเรียกอีกอย่างว่าการทดสอบโมดูลัสแตกร้าวของมอร์ตาร์ (Modulus of Rupture) หล่อขึ้นรูปตัวอย่างคานขนาด $40 \times 40 \times 160$ mm จำนวน 3 ตัวอย่างต่อส่วนผสม จากนั้นถอดแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมง บ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 3 7 28 และ 60 วัน จากนั้นนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำ เช็ดให้แห้ง วัดมิติของตัวอย่าง ก่อนนำตัวอย่างไปทดสอบกำลังคดตามมาตรฐาน ASTM C348-08 [16] ดังรูปที่ 2 (ทดสอบแบบ 3 จุด)

การทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ (Tensile Strength Test) โดยหล่อขึ้นรูปตัวอย่างตามรูปแบบแบบหล่อมอร์ตาร์รูปบริเกต (Briquet) ส่วนที่คอดมีพื้นที่หน้าตัด 25×25 mm จำนวน 3 ตัวอย่างต่ออัตราส่วนผสม จากนั้นถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง บ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 3 7 28 และ 60 วัน นำตัวอย่างขึ้นจากน้ำ เช็ดให้แห้งด้วยผ้า วัดมิติของตัวอย่าง และนำตัวอย่างไปทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C 190-77 [17] ดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์

ลำดับที่	สัญลักษณ์	อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์โดยน้ำหนัก (อัตราส่วน)				
		ปูนซีเมนต์ (GU)	ปูนซีเมนต์ (PC)	เกล็ดยไม้ยางพารา (RWA)	ทราย	น้ำ
1	GU	1.00	-	-	2.75	0.495
2	GU-10RWA	0.90	-	0.10	2.75	0.505
3	GU-20RWA	0.80	-	0.20	2.75	0.520
4	GU-30RWA	0.70	-	0.30	2.75	0.550
5	PC	-	1.00	-	2.75	0.550
6	PC-10RWA	-	0.90	0.10	2.75	0.560
7	PC-20RWA	-	0.80	0.20	2.75	0.570
8	PC-30RWA	-	0.70	0.30	2.75	0.585



(ก) การทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์



(ข) การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์



(ค) การทดสอบกำลังดัดของมอร์ตาร์



(ง) การทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์

รูปที่ 2 การทดสอบมอร์ตาร์

ผลการวิจัยและการอภิปราย

1. สมบัติพื้นฐานของวัสดุ

1.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

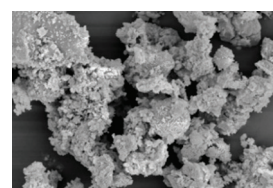
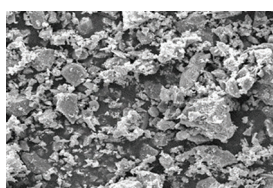
จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุ พบว่าวัสดุประสาน ปูนซีเมนต์ GU ปูนซีเมนต์ PC และเถ้าลอยไม้ยางพารา มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.14 3.15 และ 2.52 ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 ซึ่งสังเกตได้ว่า เถ้าลอยไม้ยางพาราจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าปูนซีเมนต์เช่นเดียวกันกับงานวิจัย [3] ที่พบว่าเถ้าลอยไม้ยางพารา มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.59 ด้านขนาดอนุภาคเฉลี่ย d_{50} พบว่าปูนซีเมนต์ GU ปูนซีเมนต์ PC และเถ้าลอยไม้ยางพารา มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย d_{50} เท่ากับ 15.91 14.35 และ 80.50 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 โดยขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดสอดคล้องกับงานวิจัย [18] ส่วนขนาดอนุภาคของเถ้าลอยไม้ยางพารามีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์อย่างเห็นได้ชัดซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัย [4] สมบัติพื้นฐานของวัสดุอื่น ๆ พบว่า มวลรวมละเอียดที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งโดยร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 30 พบว่า ทรายแม่น้ำมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.61 มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.96 โดยน้ำหนัก สมบัติพื้นฐานของทรายมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัย [18]

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

วัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย d_{50} (ไมโครเมตร, μm)
ปูนซีเมนต์ (GU)	3.14	15.91
ปูนซีเมนต์ (PC)	3.15	14.35
เถ้าลอยไม้ยางพารา (RWA)	2.52	80.50
ทรายแม่น้ำ	2.61	-

1.2 ลักษณะอนุภาคของวัสดุประสาน

ลักษณะอนุภาคของวัสดุประสานโดยภาพถ่ายขยายกำลังสูง Scanning Electron Microscope (SEM) ของปูนซีเมนต์ GU ปูนซีเมนต์ PC และเถ้าลอยไม้ยางพารา ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ดังรูปที่ 3 พบว่าปูนซีเมนต์ GU เป็นผงมีสีเทา ลักษณะจากภาพถ่ายกำลังสูงมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมรูปร่างไม่แน่นอนแตกต่างกัน ขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ ปูนซีเมนต์ PC เป็นผงสีเทาเข้ม ลักษณะจากภาพถ่ายกำลังสูงมีลักษณะผิวขรุขระเป็นเหลี่ยมมุม ส่วนเถ้าลอยไม้ยางพารา เป็นผงมีสีน้ำตาล ลักษณะจากภาพถ่ายกำลังสูงมีลักษณะผิวขรุขระ อนุภาคมีรูพรุนขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [19] ที่พบว่าเถ้าลอยไม้ยางพารามีอนุภาคไม่สม่ำเสมอ และมีรูพรุนของอนุภาค และงานวิจัย [4] ที่พบว่าเถ้าลอยไม้ยางพารามีรูพรุนของอนุภาคบางส่วน ขนาดอนุภาคมีหลายขนาดปนกันอยู่



(ก) ปูนซีเมนต์ GU (ข) ปูนซีเมนต์ PC (ค) เถ้าลอยไม้ยางพารา RWA
 กำลังขยาย 1,000 เท่า กำลังขยาย 1,000 เท่า กำลังขยาย 1,000 เท่า
 รูปที่ 3 ลักษณะอนุภาคของวัสดุประสานโดยภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM)

1.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

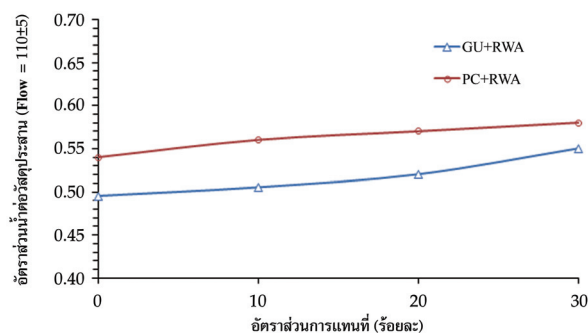
จากการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยไม้ยางพารา โดยวิธี X-ray Fluorescence (XRF) ดังตารางที่ 3 พบว่า ปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ร้อยละ 23.39 โดยน้ำหนักของวัสดุมีค่าใกล้เคียงปูนซีเมนต์ PC และปูนซีเมนต์ GU ส่วนแคลเซียมออกไซด์ มีค่าร้อยละ 33.43 ซึ่งน้อยกว่าปูนซีเมนต์ PC และปูนซีเมนต์ GU ด้วย จะเห็นได้ว่าปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ จะเป็นองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยไม้ยางพารา [4] หากผสมกับน้ำคาดการณ์ว่าสามารถเชื่อมประสานให้ตัวอย่างแข็งแรงขึ้นได้ นอกจากนี้การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ของเถ้าลอยไม้ยางพารา มีค่าร้อยละ 4.01 โดยน้ำหนักของวัสดุ ผ่านมาตรฐาน ASTM C 618-19 [20] แต่ผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ของเถ้าลอยไม้ยางพาราไม่ผ่านมาตรฐาน ASTM C 618-19 [20] เหมือนกับงานวิจัย [18] ที่พบว่าผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ของเถ้าขี้เถ้า ปูนซีเมนต์ PC และปูนซีเมนต์ GU มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุ และสอดคล้องกับงานวิจัย [21] ที่พบว่าเถ้าลอยไม้ยางพาราจะมีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ GU	ปูนซีเมนต์ PC	เถ้าลอย ไม้อย่างพารา (RWA)	มาตรฐาน ASTM C 618 Class C
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	19.36	20.75	23.39	-
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	5.37	5.14	6.84	-
ไออนออกไซด์ (Fe_2O_3)	4.30	3.05	2.41	-
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	61.39	61.74	33.43	-
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.76	2.06	2.85	-
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.13	0.15	1.26	< 1.5
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	1.10	0.57	10.86	-
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	3.54	3.89	6.41	< 5.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	2.73	2.16	4.01	< 6.0
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	29.03	28.94	32.64	> 50

2. สมบัติของมอร์ตาร์สด

ความต้องการน้ำ (Water Requirement) ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU และมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้อย่างพาราในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุตามลำดับ พบว่าการแทนที่มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU ด้วยเถ้าลอยไม้อย่างพารามีค่าความต้องการน้ำ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.505 0.520 และ 0.550 ตามลำดับ และการแทนที่มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC ด้วยเถ้าลอยไม้อย่างพารามีค่าความต้องการน้ำ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.560 0.570 และ 0.585 ดังรูปที่ 4 ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่ามอร์ตาร์มีค่าความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าลอยไม้อย่างพาราที่มากขึ้น เนื่องจากวัสดุที่แทนที่มีอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ จึงสามารถแทรกสอดเข้าระหว่างอนุภาคเพื่อให้วัสดุกระจายตัวได้น้อยลง ทำให้ต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเพื่อทำให้การไหลแผ่เท่ากัน [22]



รูปที่ 4 ความต้องการน้ำของการแทนที่มอร์ตาร์ GU และ PC ด้วยเถ้าลอยไม้อย่างพาราในอัตราส่วนที่ต่างกัน

3. สมบัติของมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว

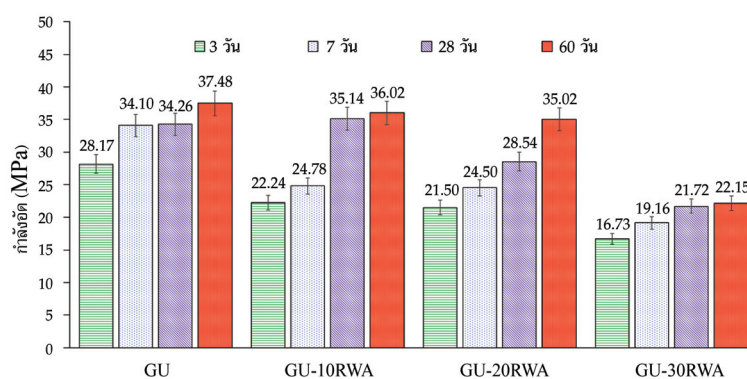
3.1 กำลังอัดของมอร์ตาร์

จากผลการทดสอบกำลังอัดของอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3 7 28 และ 60 วัน ดังตารางที่ 4 รูปที่ 5 และรูปที่ 6 พบว่า กำลังอัดของอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 28.17 34.10 34.26 และ 37.48 MPa ตามลำดับ ส่วนอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ PC มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 26.14 28.72 36.19 และ 37.84 MPa ตามลำดับ ซึ่งค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์อัตราส่วนควบคุมปูนซีเมนต์ GU และ PC มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม เหมือนกับงานวิจัย [23] และ [24]

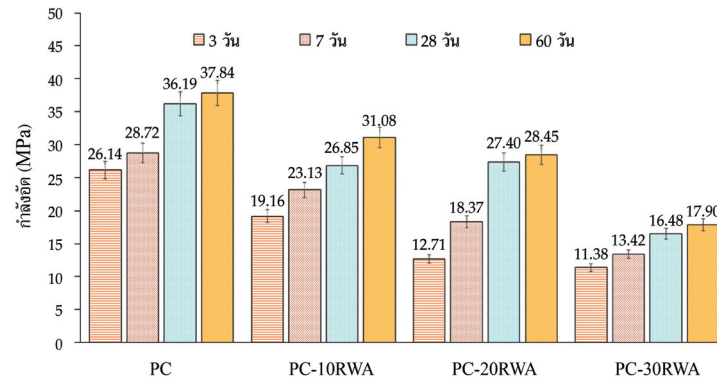
กำลังอัดมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ GU และปูนซีเมนต์ PC เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารา ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ดังตารางที่ 4 รูปที่ 5 และรูปที่ 6 ผลการทดสอบ กำลังอัดทุกอัตราส่วนจะเห็นได้ว่าเมื่อแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราบางส่วนในปูนซีเมนต์ จะทำให้ค่ากำลังอัดลดลง สอดคล้องกับปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราที่เพิ่มขึ้น [25] เนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่เป็นตัวแปรสำคัญ ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน อีกทั้งอนุภาคที่เข้ามาแทนที่มีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ จึงส่งผลให้กำลังอัด มีค่าต่ำลง แต่อย่างไรก็ตามมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราสามารถพัฒนากำลังอัดได้ เนื่องจากผลของ กระบวนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ทั้งนี้การแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ของวัสดุ มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงอัตราส่วนควบคุมปูนซีเมนต์ GU และปูนซีเมนต์ PC มากที่สุด อีกทั้งอายุการบ่ม 28 วัน ของอัตราส่วนมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU การแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดสูงกว่าอัตราส่วนควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [26] กล่าวว่า “การแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุผสม จะเอื้อร้อยละ 10 ทำให้กำลังของมอร์ตาร์สูงขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของการอัดตัวของอนุภาค” และงานวิจัยของ [27] กล่าวว่า “การแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุผสมที่มีขนาดเล็กหรือขนาดใกล้เคียงกับอนุภาคเฉลี่ยของซีเมนต์ช่วยสอดคล้อง การกระจายตัวได้ดีในเฟสได้ จึงทำให้ความสามารถในการรับกำลังดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่และหยาบกว่า” และ เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารามากกว่าในอัตราส่วนร้อยละ 10 ส่งผลให้มีกำลังอัดลดลงในทุกอัตราส่วน เนื่องจากองค์ประกอบสำหรับสร้างกำลังรับแรงอัดให้กับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU และมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC ผ่านปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) ที่ทำหน้าที่ เป็นตัวประสานมีปริมาณลดลงส่งผลให้มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU และ PC ผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราลดลงไปด้วย

ตารางที่ 4 กำลังอัดของมอร์ตาร์

ส่วนผสม	กำลังอัด (MPa)							
	3 วัน	ร้อยละ	7 วัน	ร้อยละ	28 วัน	ร้อยละ	60 วัน	ร้อยละ
GU	28.17	100	34.10	100	34.26	100	37.48	100
GU-10RWA	22.24	79	24.78	73	35.14	103	36.02	96
GU-20RWA	21.50	76	24.50	72	28.54	83	35.02	93
GU-30RWA	16.73	59	19.16	56	21.72	63	22.15	59
PC	26.14	100	28.72	100	36.19	100	37.84	100
PC-10RWA	19.16	73	23.13	81	26.85	74	31.08	82
PC-20RWA	12.71	49	18.37	64	27.40	76	28.45	75
PC-30RWA	11.38	44	13.42	47	16.48	46	17.90	47



รูปที่ 5 กำลังอัดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อายุบ่มต่างกัน

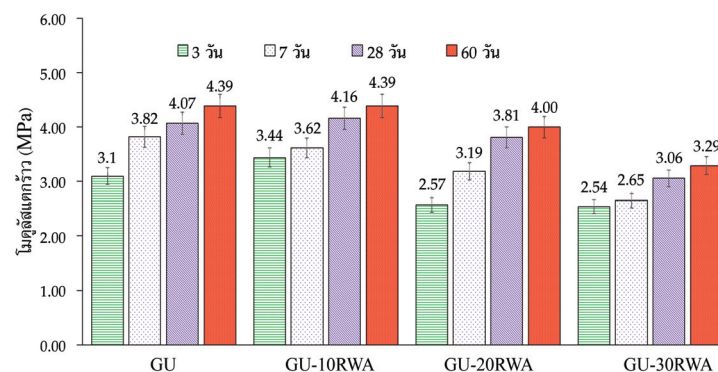


รูปที่ 6 กำลังอัดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อายุบ่มต่างกัน

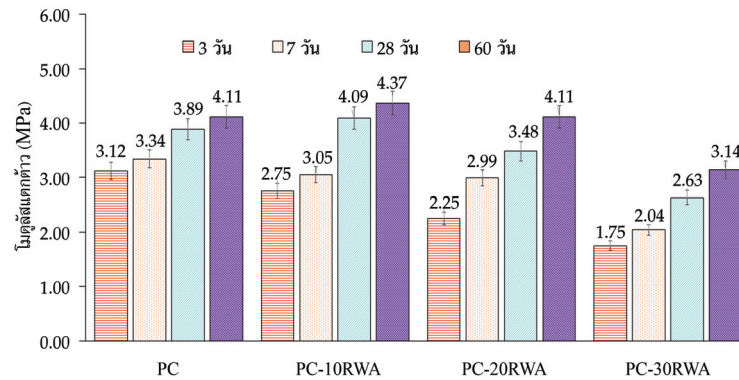
3.2 กำลังคัดของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบกำลังคัดของมอร์ตาร์ ที่อายุการบ่ม 3 7 28 และ 60 วัน ซึ่งแสดงในรูปของค่าโมดูลัสแตกร้าว พบว่ากำลังคัดของอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU ดังรูปที่ 7 และอัตราส่วนมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC ดังรูปที่ 8 มีค่าใกล้เคียงกัน และแสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาการบ่มมีผลกับการพัฒนากำลังคัดของมอร์ตาร์ด้วย เมื่อมีการแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่อายุการบ่ม 60 วัน พบว่าอัตราส่วนมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารามีค่ากำลังคัดเท่ากับ 4.39 4.00 และ 3.29 MPa ตามลำดับ ดังรูปที่ 7 และอัตราส่วนมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC แทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารามีค่ากำลังคัดเท่ากับ 4.37 4.11 และ 3.14 MPa ตามลำดับ ดังรูปที่ 8 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่ากำลังคัดทั้งมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU และ PC อัตราส่วน 10RWA สามารถรับกำลังคัดได้สูงกว่ามอร์ตาร์อัตราส่วนควบคุม จากนั้นกำลังคัดจะค่อย ๆ ลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่เพิ่มขึ้นของเถ้าลอยไม้ยางพารา

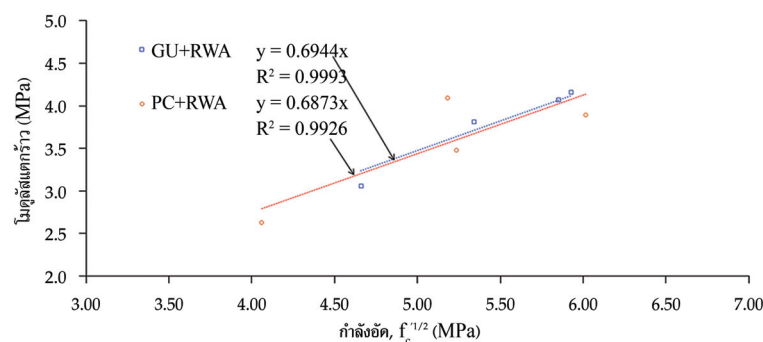
การเปรียบเทียบกำลังคัด (f_b) กับกำลังอัดของมอร์ตาร์ (f_c') อัตราส่วนมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU และอัตราส่วนมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC ที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารามีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารากำลังคัดมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องตามกำลังอัดที่ลดลงด้วย ดังรูปที่ 9 ซึ่งหากเปรียบเทียบกำลังคัดกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ GU จะมีค่าเท่ากับ $f_b = 0.6944\sqrt{f_c'}$ และหากเปรียบเทียบกำลังคัดกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ PC มีค่าเท่ากับ $f_b = 0.6873\sqrt{f_c'}$ สอดคล้องกับงานวิจัยของ [8] แสดงให้เห็นว่า กำลังรับแรงอัดสามารถใช้คาดการณ์กำลังคัดได้ [28]



รูปที่ 7 กำลังคัดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อายุบ่มต่างกัน



รูปที่ 8 กำลังอัดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อายุบ่มต่างกัน

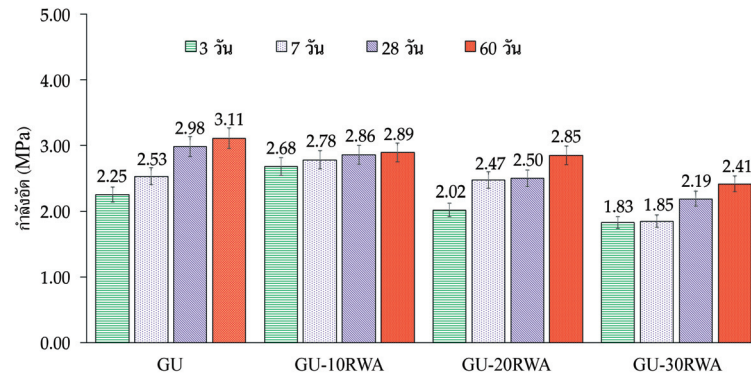


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับกำลังอัดของมอร์ตาร์เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารา

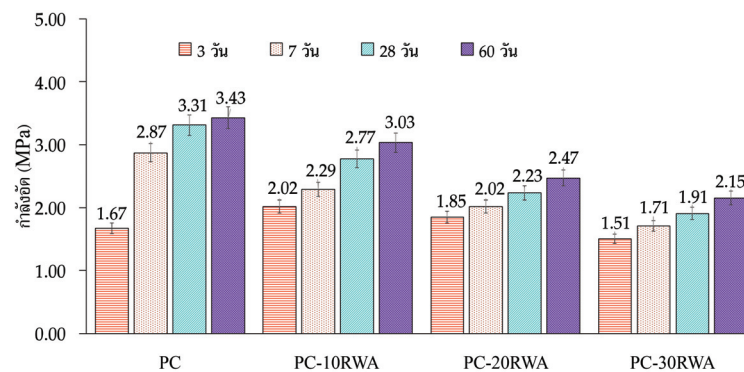
3.3 กำลังดึงของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 3 7 28 และ 60 วัน พบว่า กำลังดึงของอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU ดังรูปที่ 10 และอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC ดังรูปที่ 11 มีค่าใกล้เคียง และสอดคล้องกัน การเพิ่มขึ้นของกำลังดึงสอดคล้องกับอายุการบ่มที่มากขึ้นเหมือนกับ [29] ที่พบว่า เมื่ออายุบ่มมอร์ตาร์มากขึ้นส่งผลให้กำลังดึงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นด้วย และเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พิจารณาที่อายุการบ่ม 60 วัน อัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU แทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารามีค่าเท่ากับ 2.89 2.85 และ 2.41 MPa ตามลำดับ ดังรูปที่ 10 และอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC แทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารามีค่าเท่ากับ 3.03 2.47 และ 2.15 MPa ตามลำดับ ดังรูปที่ 11 ซึ่งจากผลกำลังดึงของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU และ PC หากเทียบกับอัตราส่วนควบคุม ปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน กำลังดึงมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนควบคุมเล็กน้อยมีค่าใกล้เคียงที่สุด และเมื่อปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราเพิ่มขึ้น กำลังดึงก็จะลดน้อยลงด้วยซึ่งมีความสอดคล้องกัน

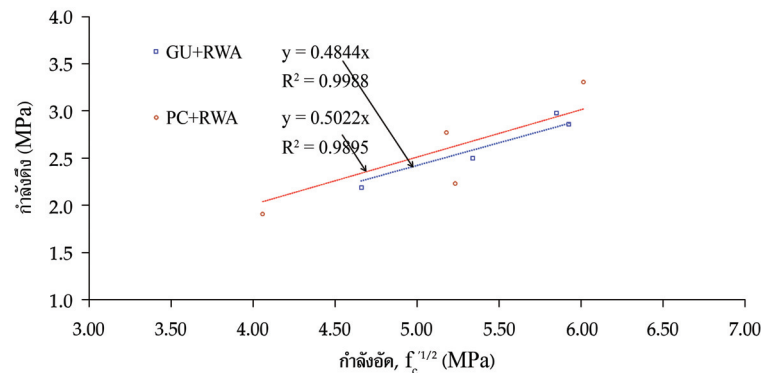
หากเปรียบเทียบกำลังดึง (f_t) กับกำลังอัด (f_c) ที่อายุบ่ม 28 วัน จากรูปที่ 12 ความสัมพันธ์เหมือนกับงานวิจัย [30] จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยในอัตราส่วนผสมทั้งมอร์ตาร์ GU และ PC ทำให้กำลังดึงลดลง สอดคล้องกับกำลังอัดที่ลดลงด้วย ซึ่งหากเปรียบเทียบกำลังดึงกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ GU จะมีค่าเท่ากับ $f_t = 0.4844\sqrt{f_c}$ และหากเปรียบเทียบกำลังดึงกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ PC มีค่าเท่ากับ $f_t = 0.5022\sqrt{f_c}$ ใกล้เคียง ACI Committee 318 [31] ดังนั้นกำลังดึงที่เกิดขึ้น สามารถคาดการณ์ได้จากผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์



รูปที่ 10 กำลังดึงของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อายุบ่มต่างกัน



รูปที่ 11 กำลังดึงของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อายุบ่มต่างกัน



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงกับกำลังอัดของมอร์ตาร์เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารา

บทสรุป

การศึกษากำลังของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราจากอุตสาหกรรม ผลการวิจัยพบว่า เถ้าลอยไม้ยางพารามีลักษณะอนุภาคผิวขรุขระ มีรูพรุน และขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ องค์ประกอบทางเคมี ประกอบด้วยแคลเซียม ออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก ไม่จัดเป็นวัสดุปอซโซลาน มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราที่มากขึ้น และด้านกำลังพบว่า กำลังอัดมอร์ตาร์มีค่าลดลงเมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารามากขึ้น อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ GU สามารถใช้เถ้าลอยไม้ยางพาราได้ถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่วนมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC สามารถใช้เถ้าลอยไม้ยางพาราได้ถึงร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ด้านกำลังคดของมอร์ตาร์พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถรับกำลังคดได้สูงกว่ามอร์ตาร์

ส่วนผสมควบคุม และด้านกำลังดึงของมอร์ตาร์พบว่า กำลังดึงมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยไม่อย่างพาราที่เพิ่มมากขึ้น ผลการทดสอบด้านกำลังดึงแสดงให้เห็นว่า กำลังรับแรงอัดสามารถใช้คาดการณ์กำลังดัด และกำลังดึงได้ อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยไม่อย่างพาราที่เหมาะสม คือร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งสามารถต่อยอดและพัฒนาในการใช้ประโยชน์ต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่สนับสนุนในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณ บริษัท พาเนล พลัส จำกัด อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ที่สนับสนุนวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย และขอขอบคุณนางสาวจิตรลดา ชมจันทร์ และนางสาววิริยา พุดคำ นักศึกษาสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ช่วยให้การวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

References

- [1] Hawa, A. and Tonnayopas, D. (2008). Effect of Rubber Wood Fly Ash on Properties of Pumice Aggregate Concrete. In **Proceeding of the 6th PSU-Engineering Conference**. pp. 115-120 (in Thai)
- [2] Dasaesamoh, A., Maming, J., Radeang, N., and Awae, Y. (2011). Physical Properties and Mechanical Properties of Para Rubber Wood Fly Ash Brick. **Journal of Yala Rajabhat University**. Vol. 6, No. 1, pp. 25-35 (in Thai)
- [3] Klathae, T., Sornpakdee, N., Buathongkhue, C., and Deedard, N. (2020). Utilization of Parawood Ash in Concrete Paving Blocks. **Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal**. Vol. 12, No. 1, pp. 36-48 (in Thai)
- [4] Thongkhwan, T., Chusilp, N. and Laksanakit, C. (2022). The Strength of Concrete with Rubber Ash for Prefabricated Structure. In **The 27th National Convention on Civil Engineering**. MAT09-1- MAT09-7 (in Thai)
- [5] Roy, S. K., Poh, K. B., and Northwood, D. O. (1998). Durability of concrete-Accelerated Carbonation and Weathering Studies. **Building and Environment**. Vol. 34, No. 5, pp. 597-606. DOI: 10.1016/S0360-1323(98)00042-0
- [6] Fattuhi, N. I. (1986). Carbonation of Concrete Affected by Mic Constituents and Initial Water Curing Period. **RILEM Publications SARL**. Vol. 19, Issue 110, pp. 131-136
- [7] Sanawung, W., Tangchirapat, W., and Jaturapitakkul, C. (2018). Strength, Abrasion Resistance, and Chloride Ion Penetration of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash. **KMUTT Research & Development Journal**. Vol. 41, No. 1, pp. 83-96 (in Thai)
- [8] Siri wattanasanon, D., Chatveera, B., Sua-iam, G., and Yamoat, N. (2023). Engineering Properties of Mortars Incorporating Recycled Fibers from Waste Printed Circuit Boards. **The Journal of Industrial Technology**. Vol. 19, Issue 2, pp. 31-46. DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.06.002 (in Thai)
- [9] Zhao, Y., Chen, X., Wang, Z., Zhang, Y., and Leng, Y. (2023). An Experimental Study on the Influence of Fly Ash and Crumb Rubber on the Mechanical Property and Permeability of Engineered Cementitious Composite (ECC). **Journal of Building Engineering**. Vol. 76, pp. 1-15. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.106998

- [10] TIS 2594-2556. Hydraulic Cement. **Thai Industrial Standard**. ISBN 978-616-231-470-4 (in Thai)
- [11] TIS 15-2562. Portland Cement. **Thai Industrial Standard**. ISBN 978-616-475-175-0 (in Thai)
- [12] ASTM C 778-00. (2001). Standard Specification for Standard Sand. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 4, No. 1
- [13] ASTM C 230/C 230M-98. (2001). Standard Specification for Flow Table for Use in Test of Hydraulic Cement. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 4, No. 1
- [14] ASTM C 305-99. (2001). Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 4, No. 1
- [15] ASTM C 109/C 100M-99. (2001). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or [50 mm] Cube Specimens). **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 4, No. 1
- [16] ASTM C 348-08. (2009). Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic Cement Mortars. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 4, No. 1
- [17] ASTM C 190-77. (2001). Standard Test Method for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars. **Annual Book of ASTM Standards**.
- [18] Wangbooncong, K., Chusilp, N., and Laksanakit, C. (2022). Characteristics of Municipal Waste Ash Affecting Mechanical Properties and Expansion of Mortar Immersed in Sodium Sulfate Solution. **Engineering Journal of Research and Development**. Vol. 33, No. 2, pp. 77-90 (in Thai)
- [19] Masae, M., Sikong, L., Kongsong, K., Phoempoon, P., Rawangwong, S., and Sririkun, W. (2013). Application of Rubber Wood Ash for Removal Nickel and Copper from Aqueous Solution. **Environment and Natural Resources J**. Vol. 11, No. 2, pp. 17-27
- [20] ASTM C 618-19. (2019). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. **Annual Book of ASTM Standards**.
- [21] Laksanakit, C., Swasdi, S., Tabyang, W., Chusilp, N., Kuasakul, T., Thongkhwan, T., Kongphet, N., Petchdee, T., and Naemsai, T. (2023). Effect of Rubberwood Fly Ash on Thermal Conductivity of Cement Fiber Board. **Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)**. Vol. 16, No. 3, pp. 51-65 (in Thai)
- [22] Chatveera, B. and Makul, N. (2012). Effect of the Particle Size of Limestone Powder on Portland Cement Mortar Mixed with Rice Husk Ash. **Engineering Journal of Research and Development**. Vol. 23, No. 1, pp. 10-17 (in Thai)
- [23] Sukayanudist, S. (2011). **Sulfate Resistance of Mortar with Limestone Powder**. M. ENG. Dissertation Civil Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi (in Thai)
- [24] Rumman, R., Kamal, M. R., Bediwy, A., and Alam, M. A. (2023). Partially Burnt Wood Fly Ash Characterization and Its Application in Low-Carbon Mortar and Concrete. **Construction and Building Materials**. Vol. 402, 132946, pp. 1-18. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132946
- [25] Hawa, A. and Tonnayopas, D. (2013). Lightweight Aggregate Concrete Blended with Rice Husk Ash and Para Rubber Wood Fly Ash. In **the 11th International Conference on Mining Materials and Petroleum Engineering**. pp. 11-13
- [26] Khan, M. N. N., Jamil, M., Karim, M. R., Zain, M. F. M., and Kaish, A. B. M. A. (2017). Filler Effect of Pozzolanic Materials on the Strength and Microstructure Development of Mortar. **KSCE Journal of Civil Engineering**. Vol. 21, pp. 274-284. DOI: 10.1007/s12205-016-0737-5



- [27] Bouthong, P., Amritbenjaruethai, R., and Tonnayopas, D. (2014). Properties of Mortar Blended Modified Granite Fine. **Thaksin University Journal**. Vol. 17, No. 1, pp. 5-12 (in Thai)
- [28] Teixeira, E. R., Mateus, R., Camoes, A., and Branco, F. G. (2019). Quality and Durability Properties and Life-Cycle Assessment of High Volume Biomass Fly Ash Mortar. **Construction and Building Materials**. Vol. 197, pp. 195-207. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.173
- [29] Tanthikulwichit, N. and Ouypornprasert, W. (2021). Effect of Superplasticizer on Flow, Compressive Strength and Tensile Strength of Mortars. In **Proceeding of the 26th National Convention on Civil Engineering**. pp. MAT09- 1-8 (in Thai)
- [30] Poonpotmas, W., Intasai, T., Thanalue, T., Buacham, M., Thongarunsri, S., Haemawiboon, S., and Tangtermsirikul, S. (2017). Effect of Water-cement Ratio on Modulus of Rupture and Tensile Strain Capacity of Concrete. **UTK Research Journal**. Vol. 11, No. 2, pp. 96-104 (in Thai)
- [31] ACI Committee 318. (1999). **Building Code Requirements for Structural Concrete Institute**. Farmington Hills.