



บทความวิจัย

การปรับปรุงกำลังอัดของมอร์ตาร์จากเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบด

เทีย่ง ชีวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 9791 5171 อีเมล: wichian@buu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2025.12.002

รับเมื่อ 17 มิถุนายน 2568 แก้ไขเมื่อ 24 กันยายน 2568 ตอบรับเมื่อ 15 ตุลาคม 2568 เผยแพร่ออนไลน์ 9 ธันวาคม 2568

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำร่วมกับเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบด โดยใช้แทนปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในอัตราส่วนร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และแปรเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อเถ้าปาล์มน้ำมันเท่ากับ 30:70 50:50 และ 70:30 โดยน้ำหนัก ทดสอบกำลังอัดหลังบ่มตัวอย่างที่อายุ 14 28 และ 56 วัน รวมทั้งศึกษาผลของการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้นต่างกัน ผลการศึกษาพบว่าในอัตราการแทนที่วัสดุปอซโซลานเท่ากันการเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันส่งผลให้กำลังอัดลดลง นอกจากนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ให้สูงขึ้นไม่เกิน 1.0 โมลาร์ ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น โดยเห็นผลชัดเจนในส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์ปริมาณต่ำ อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงถึง 1.5 โมลาร์ กลับทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลง

คำสำคัญ: เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ เถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่บด มอร์ตาร์ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กำลังอัด



Improvement of Compressive Strength of Mortar from Unground Palm Oil Fuel Ash

Tieng Cheewaket and Wichian Chalee*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 9791 5171, E-mail: wichian@buu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2025.12.002

Received 17 June 2025; Revised 24 September 2025; Accepted 15 October 2025; Published online: 9 December 2025

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aimed to study the compressive strength of mortar incorporating low-calcium fly ash and unground palm oil fuel ash as partial replacements for hydraulic cement at replacement levels of 20%, 30%, and 40% by weight. The ratios between fly ash and palm oil fuel ash were varied at 30:70, 50:50, and 70:30 by weight. Compressive strength was determined at curing ages of 14, 28, and 56 days. In addition, the effect of activating the mixtures with sodium hydroxide (NaOH) solution at different concentrations was investigated. The results showed that, at the same replacement level of pozzolanic materials, increasing the proportion of palm oil fuel ash resulted in a decrease in compressive strength. Moreover, increasing the NaOH concentration up to 1.0 molar enhanced the compressive strength of the mortar, with a more pronounced effect observed in mixtures containing lower cement content. However, when the NaOH concentration reached 1.5 molar, the compressive strength of the mortar decreased.

Keywords: Low-calcium Fly Ash, Unground Palm Oil Fuel Ash, Mortar, Sodium Hydroxide Solution, Compressive Strength

1. บทนำ

ปัจจุบันแนวโน้มการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นส่วนสำคัญในงานวัสดุก่อสร้างทางวิศวกรรม โดยมีเป้าหมายเพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจก การพัฒนาวัสดุประสานทางเลือกที่ผลิตจากของเหลือทิ้งในภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมได้รับความสนใจและศึกษาอย่างแพร่หลายมากขึ้น โดยเฉพาะการใช้วัสดุปอซโซลานซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในสภาวะที่มีความชื้น ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ผสมที่มีความแข็งแรงและคงทน [1], [2] เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นเถ้าชีวมวลที่มีสมบัติทางเคมีที่เป็นวัสดุปอซโซลาน และมีศักยภาพที่สามารถใช้เป็นวัสดุประสานในงานก่อสร้างได้ โดยทะลายปาล์ม เปลือกปาล์ม และกะลาปาล์ม เป็นวัสดุชีวมวลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงที่เผาในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าชีวมวล การเผาดังกล่าวได้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีสมบัติทางเคมีที่เป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) และมีศักยภาพในการใช้งานทางวิศวกรรมได้ แต่ต้องผ่านการบดให้ละเอียดก่อน [3]–[5] แนวทางที่จะนำเถ้าชีวมวลเหล่านี้มาใช้งานในเชิงวิศวกรรมได้ต้องใช้ร่วมกับวัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพดี และใช้ต่างในการชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าชีวมวล เพื่อให้สามารถเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สมบูรณ์มากขึ้น [6], [7]

การศึกษาที่ผ่านมาพบว่าอัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกา (Ca/Si) มีผลต่อคุณลักษณะของ C-S-H ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยค่า Ca/Si ที่ลดลงจะส่งผลให้เกิดโครงสร้าง C-S-H ที่มีความหนาแน่นและความคงทนสูงขึ้น [8] นอกจากนี้การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดสามารถเพิ่มกำลังอัดและลดการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตได้อย่างมีนัยสำคัญ [5] อย่างไรก็ตามเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบดมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่ำ ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลและสมบัติด้านความคงทนลดลงอย่างชัดเจน งานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางการใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำร่วมกับเถ้าปาล์มน้ำมันไม่บด เพื่อให้ได้อัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกาที่ต่ำลงและอาจส่งผลต่อการเกิดสารประกอบ C-S-H

ที่มีโครงสร้างแข็งแรงและมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีได้

ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุประสาน ที่มีลักษณะทางกายภาพที่ไม่ดี ให้สามารถประยุกต์ใช้งานเพื่อเป็นวัสดุประสานในงานก่อสร้าง ตามกำลังที่เหมาะสมกับลักษณะของงานได้ โดยมุ่งเน้นการปรับปรุงกลไกทางปฏิกิริยาเคมีมากกว่าการปรับปรุงทางกายภาพ โดยใช้ต่างที่มีความเข้มข้นต่างกัน ในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในวัสดุประสานที่ผสมเถ้าถ่านหิน ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพดีกับเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีสมบัติทางกายภาพที่ไม่ดี (อนุภาคหยาบ พูน ดูน้ามาก) และแทนที่ในปูนซีเมนต์ไฮโดรลิก โดยหวังผลให้สามารถใช้เป็นวัสดุประสานในงานก่อสร้างได้ โดยไม่ต้องบดให้ละเอียดก่อน ตลอดจนเป็นแนวทางในการพัฒนาเถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมชนิดอื่น ๆ ให้สามารถใช้งานได้ดีขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุประสาน

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้านี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ไฮโดรลิก ตามมาตรฐาน มอก. 2594-2567 [9] สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เถ้าปาล์มน้ำมันที่ยังไม่ผ่านการบดและเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ โดยเถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะทางกายภาพ ค่อนข้างหยาบ สีเทา และมีสีดำปะปน ทำให้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.97 และความละเอียดข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 44.2 โดยน้ำหนัก การศึกษานี้ใช้เถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.21 และความละเอียดข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 31.9 โดยน้ำหนัก ซึ่งไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C618 [10] สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันมีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 65.3 มีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ร้อยละ 69.7 มีค่า LOI ร้อยละ 10 ส่วนเถ้าถ่านหินมีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับ

ร้อยละ 72.21 ซึ่งจัดเป็นเกรดานหินชนิด F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)		
	ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	เถ้าปาล์มน้ำมัน (P)	เถ้าถ่านหิน (F)
Silicon Dioxide; SiO ₂	18.10	65.30	35.20
Aluminum Oxide; Al ₂ O ₃	4.20	2.50	19.20
Iron Oxide; Fe ₂ O ₃	3.90	1.90	17.81
Calcium Oxide; CaO	67.94	6.40	16.65
Magnesium Oxide; MgO	1.15	3.00	-
Sodium Oxide; Na ₂ O	0.21	0.30	0.63
Potassium Oxide; K ₂ O	0.43	5.70	2.44
Sulfur Trioxide; SO ₃	2.72	0.40	1.50
LOI.	0.83	10.00	0.15

2.2 มวลรวม

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.70 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.78 และโมดูลัสความละเอียด เท่ากับ 2.61

2.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.3.1 ส่วนผสมมอร์ตาร์

การศึกษครั้งนี้แบ่งเป็น 2 ตอน ตอนที่ 1 ไม่ใช้ต่างกระตุ่น และตอนที่ 2 เลือกส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสูงสุด (I80_F30:P70) และต่ำสุด (I60_F30:P70) ในกลุ่มที่ใช้ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันมากที่สุด คือ ร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก วัสดุปอซโซลาน มากระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบในตอนที่ 1

ได้ใช้เถ้าถ่านหินและเถ้าปาล์มน้ำมันแทนปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในอัตราส่วนร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และแปรเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อเถ้าปาล์มน้ำมัน เท่ากับ 30:70 50:50 และ 70:30 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุต่อทราย เท่ากับ 1:2.75 และใช้น้ำผสมที่ให้ค่าการไหลแก่เท่ากับร้อยละ 110±5 ตอนที่ 2 นำส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสูงสุด (I80_F30:P70) และต่ำสุด (I60_F30:P70) ในกลุ่มที่ใช้ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันมากที่สุด คือ ร้อยละ 70 โดยน้ำหนักวัสดุปอซโซลาน มาปรับปรุงกำลังอัดต่อเนื่องโดยใช้สารละลาย NaOH เป็นตัวกระตุ้นที่ความเข้มข้น 0.25 0.50 1.00 และ 1.50 โมลาร์ แทนน้ำ ส่วนผสมมอร์ตาร์แสดงดังตารางที่ 2 หล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ ขนาด 50 × 50 × 50 มม.³ เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่มในน้ำเป็นเวลา 14 28 และ 56 วัน ตามสัดส่วนผสมในตารางที่ 2 โดยกำหนดค่าการไหลแก่ของมอร์ตาร์ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 105–115 การเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 [11] ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย (ก) การทดสอบการไหลแก่ของมอร์ตาร์ (ข) การหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ และ (ค) ตัวอย่างมอร์ตาร์หลังการบ่ม

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมโดยน้ำหนักของมอร์ตาร์

ส่วนผสม	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก				
	ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	เถ้าถ่านหิน (F)	เถ้าปาล์มน้ำมัน (P)	ทราย	W/B
I80_F30:P70	0.80	0.06	0.14	2.75	0.60
I80_F50:P50	0.80	0.10	0.10	2.75	0.60
I80_F70:P30	0.80	0.14	0.06	2.75	0.62
I70_F30:P70	0.70	0.09	0.21	2.75	0.60
I70_F50:P50	0.70	0.15	0.15	2.75	0.60
I70_F70:P30	0.70	0.21	0.09	2.75	0.61
I60_F30:P70	0.60	0.12	0.28	2.75	0.60
I60_F50:P50	0.60	0.20	0.20	2.75	0.60
I60_F70:P30	0.60	0.28	0.12	2.75	0.60



(ก) การทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์



(ข) การหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์



(ค) ตัวอย่างมอร์ตาร์หลังการบ่ม

รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์สำหรับทดสอบกำลังอัด โดย (ก) การทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ (ข) การหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ และ (ค) ตัวอย่างมอร์ตาร์หลังการบ่ม

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์

เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังของมอร์ตาร์ตามระยะเวลาในการบ่ม ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าทุกส่วนผสมมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยสังเกตได้จากร้อยละของกำลังอัดที่อายุต่าง ๆ เทียบกับอายุ 14 วัน โดยพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมวัสดุปอชโซลานในสัดส่วนที่มากขึ้น มีการพัฒนากำลังอัดที่แสดงในรูปของร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 56 วัน เทียบกับอายุ 14 วัน มีแนวโน้มสูงขึ้น เช่น มอร์ตาร์ที่ผสมวัสดุปอชโซลานร้อยละ 20 30 และ 40 โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินและเถ้าปาล์มน้ำมัน 50:50 มีร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 56 วัน เทียบกับอายุ 14 วัน เท่ากับ 146 168 และ 169 ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้วัสดุปอชโซลานในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลชัดเจนต่อการพัฒนากำลังในระยะยาว และส่งผลให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุมากขึ้นเทียบกับอายุต้น มีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาปอชโซลานที่ส่งผลต่อเนื่องให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นในอายุปลาย [7], [12], [13]

เมื่อพิจารณากลุ่มที่ใช้วัสดุปอชโซลานที่เท่ากันพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินในสัดส่วนที่มากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 56 วัน เทียบกับอายุ 14 วัน มีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อเถ้าปาล์มน้ำมันเท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก มีร้อยละกำลังอัดที่อายุ 56 วัน เทียบกับอายุ 14 วัน สูงที่สุดในทั้ง 3 กลุ่ม แสดงให้เห็นว่าการใช้อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อเถ้าปาล์มน้ำมัน 50:50 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้กำลังอัดมากขึ้นจากอายุ 14 วัน ค่อนข้างชัดเจน

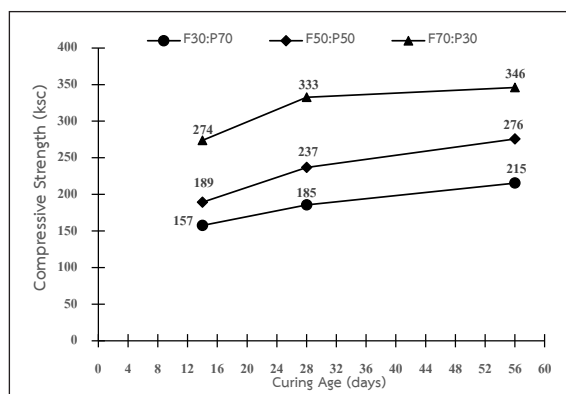
เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัดจากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์กับอายุการบ่ม ดังรูปที่ 2 พบว่ากำลังอัดมีอัตราการเพิ่มขึ้นในช่วง 14-28 วัน มากกว่าช่วงอายุ 28-56 วัน โดยเห็นผลชัดเจนในกลุ่มที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกปริมาณสูง (วัสดุปอชโซลานร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก) ตามรูปที่ 2 (ก) มากกว่ากลุ่มที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกปริมาณต่ำ (วัสดุปอชโซลานร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก) ดังรูปที่ 2 (ข) สังเกตได้จากความชันของกราฟ ในช่วง 14-28 วัน และช่วง 28-56 วัน ทั้งนี้ เป็นผลจากกลุ่มที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

ปริมาณสูงกำลังอัดในช่วงต้นเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เป็นผลจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกกับน้ำ จึงส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์กลุ่มนี้ในช่วงต้นเร็วกว่าช่วงปลาย ส่วนกลุ่มที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกลดลง สังเกตเห็นว่าความชันของกราฟในช่วง 28-56 วัน มีแนวโน้มสูงกว่าช่วงต้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่มีปริมาณมากในส่วนผสม ส่งผลให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้นในช่วงปลาย

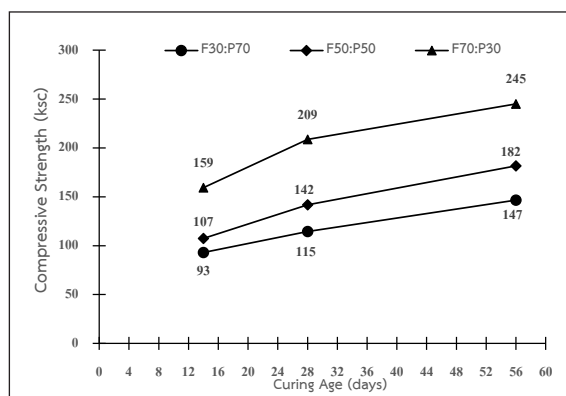
ตารางที่ 3 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 14 28 และ 56 วัน

ส่วนผสม	กำลังอัดมอร์ตาร์ (กก./ซม ²)			ร้อยละ กำลังอัด ที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 14 วัน	ร้อยละ กำลังอัด ที่อายุ 56 วัน เทียบกับ 14 วัน	Ca/Si (Molar Ratio)
	14 วัน	28 วัน	56 วัน			
I80_F30:P70	157	185	215	118	136	2.34
I80_F50:P50	189	237	276	125	146	2.48
I80_F70:P30	274	333	346	122	126	2.62
I70_F30:P70	117	155	190	133	163	1.83
I70_F50:P50	131	161	220	124	168	1.97
I70_F70:P30	217	269	296	124	136	2.13
I60_F30:P70	93	115	147	123	158	1.43
I60_F50:P50	107	142	182	132	169	1.57
I60_F70:P30	159	209	245	131	154	1.73

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วน Ca/Si โดยโมลาร์ ต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ในรูปร้อยละกำลังอัดที่อายุ 56 วัน เทียบกับ 14 วัน ดังตารางที่ 3 พบว่าอัตราส่วน Ca/Si ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ เช่น มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 60 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ Ca/Si เท่ากับ 1.58 1.57 และ 1.73 ให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 56 วัน เทียบกับ 14 วัน เท่ากับ 158 169 และ 154 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปัจจัยอื่น เช่น ปริมาณปูนซีเมนต์ และความละเอียดของวัสดุปอซโซลานมีผลต่อการพัฒนา



(ก) ผสมวัสดุปอซโซลาน ร้อยละ 20



(ข) ผสมวัสดุปอซโซลาน ร้อยละ 40

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าปาล์มน้ำมัน (ก) ร้อยละ 20 และ (ข) ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสานกับอายุการบ่ม

กำลังอัดของมอร์ตาร์มากกว่าอัตราส่วน Ca/Si เพียงอย่างเดียว

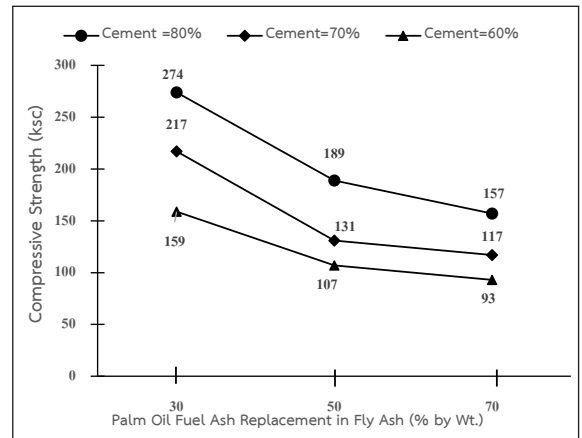
3.2 ผลของปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

การศึกษานี้ได้พิจารณาผลของปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันผสมเถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยใช้อัตราส่วนของเถ้าถ่านหินต่อเถ้าปาล์มน้ำมันที่ 30:70 50:50 และ 70:30 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของปริมาณการแทนที่วัสดุปอซโซลาน (เถ้าปาล์มน้ำมันผสมเถ้าถ่านหิน) ในปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

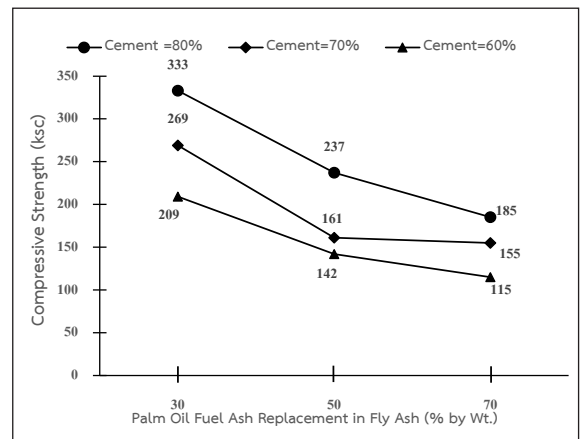
ที่อายุการบ่ม 14 และ 28 วัน ดังรูปที่ 3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ พบว่าการลดปริมาณปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในส่วนผสม และเพิ่มปริมาณวัสดุปอซโซลาน (เถ้าถ่านหินผสมกับเถ้าปาล์มน้ำมัน) ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในช่วงอายุการบ่มต้น ๆ (14 วัน) ซึ่งเป็นช่วงที่กำลังอัดของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกพัฒนาได้รวดเร็วจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

เมื่อพิจารณาผลของการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้นพบว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันในส่วนผสมที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงในทุกช่วงอายุการบ่ม เช่น ในกรณีที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน อยู่ในช่วง 115–185 กก./ cm^2 ขึ้นอยู่กับปริมาณปูนซีเมนต์ การลดลงของกำลังอัดเมื่อใช้ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันสูงขึ้น เป็นผลจากลักษณะทางกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบด ซึ่งมีอนุภาคหยาบ มีรูพรุนสูง และความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่ำส่งผลให้ C-S-H ที่เป็นตัวหลักของกำลังอัดในปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานลดลง [12], [13] อย่างไรก็ตามการใช้อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าปาล์มน้ำมันที่เหมาะสม เช่น 70:30 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เถ้าถ่านหินมีสัดส่วนสูงกว่าช่วยชดเชยข้อด้อยของเถ้าปาล์มน้ำมันได้บางส่วน โดยทำให้กำลังอัดสูงขึ้นได้เนื่องจากเถ้าถ่านหินชนิด F มีสมบัติการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ดีกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่บด ทั้งในด้านความละเอียดทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีที่มี SiO_2 และ Al_2O_3 ในปริมาณสูง ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปริมาณและสัดส่วนของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ร่วมกับเถ้าถ่านหิน มีผลโดยตรงต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ และการควบคุมปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบวัสดุประสานทางเลือกที่ให้สมบัติเชิงกลทางวิศวกรรมที่ดี

ผลการศึกษาครั้งนี้เสนอแนวทางการประยุกต์ใช้สำหรับเป็นวัสดุประสานในงานก่อสร้างใน 2 ลักษณะ คือ วัสดุก่อสร้างที่ไม่เน้นรับแรงเชิงกลสูง เช่น บล็อกก่อผนัง บล็อกประสานหรือบล็อกปูพื้น ซึ่งต้องการกำลังอัดอยู่ในช่วงประมาณ 150–200 กก./ cm^2 สามารถประยุกต์ใช้



(ก) อายุบ่ม 14 วัน



(ข) อายุบ่ม 28 วัน

รูปที่ 3 ผลของวัสดุปอซโซลานต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุบ่ม (ก) 14 วัน และ (ข) 28 วัน

ส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ร้อยละ 60 และวัสดุปอซโซลาน (เถ้าถ่านหิน ร้อยละ 30 ร่วมกับเถ้าปาล์มน้ำมัน ร้อยละ 70) ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 159 กก./ cm^2 เป็นส่วนผสมที่มีต้นทุนวัสดุต่ำ เนื่องจากใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในสัดส่วนสูงซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมที่มีราคาถูก ส่วนงานโครงสร้างอาจต้องการกำลังอัดที่สูงกว่า 300 กก./ cm^2 ควรใช้ส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ร้อยละ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และ

ใช้สัดส่วนของเถ้าถ่านหินต่อเถ้าปาล์มน้ำมันเท่ากับ 70:30 ซึ่งให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 333 กก./ cm^2 และเพิ่มขึ้นเป็น 346 กก./ cm^2 ที่อายุ 56 วัน ซึ่งกำลังอัดที่เสนอได้เพื่อกำลังอัดที่ลดลงเมื่อใช้เป็นงานคอนกรีต

3.3 ผลของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์โดยเลือกส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสูงสุด (I80_F30:P70) และต่ำสุด (I60_F30:P70) ในกลุ่มที่ใช้ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันมากที่สุด คือ ร้อยละ 70 โดยน้ำหนักวัสดุปอซโซลานมากระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แสดงผลทดสอบดังตารางที่ 4

ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของ NaOH มีผลโดยตรงต่อการเพิ่มกำลังอัดในช่วงอายุ 14, 28 และ 56 วัน และมีความแตกต่างกันระหว่างกลุ่มที่ใช้ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่สูงและต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างกลุ่มที่ผสมที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในปริมาณสูง (I80_F30:P70) กับส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์ต่ำ (I60_F30:P70) โดยทั้งสองกลุ่มใช้ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันในสัดส่วนสูงสุด คือ ร้อยละ 70 โดยน้ำหนักวัสดุปอซโซลาน พบว่าการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นส่งผลให้มอร์ตาร์ทั้งสองกลุ่มมีกำลังอัดสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการใช้ต่างที่มีความเข้มข้นที่สูงขึ้นในมอร์ตาร์ ส่งผลให้สามารถชะลอการเกิดและอะลูมินาได้ดีขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ให้กำลังอัดได้ดีขึ้น [7], [14] นอกจากนี้พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ NaOH จาก 0.00 โมลาร์ (ไม่กระตุ้น) เป็น 1.00 โมลาร์ ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ I80_F30:P70 ที่อายุ 56 วัน เพิ่มขึ้นจาก 215 กก./ cm^2 เป็น 264 กก./ cm^2 คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 22.7 ขณะที่ในส่วนผสม I60_F30:P70 มีกำลังอัดในช่วงอายุเดียวกันเพิ่มขึ้นจาก 147 กก./ cm^2 เป็น 214 กก./ cm^2 คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นร้อยละ 45.6 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลานด้วยสารละลายต่างมีประสิทธิภาพมากกว่าในวัสดุประสานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำ

เนื่องจากสารละลายต่างได้ชะลอการเกิดและอะลูมินาจากวัสดุปอซโซลาน ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้เกิดเจล C-S-H หรือ C-A-H ที่มีสมบัติยึดประสานที่ดีและส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น โดยส่งผลกระทบในส่วนผสมที่ใช้วัสดุปอซโซลานปริมาณมาก ดังนั้นในส่วนผสมที่มีปริมาณปูนซีเมนต์สูงจึงพบว่าสามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่การกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง NaOH มีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดในส่วนที่น้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในครั้งนี้ว่ามอร์ตาร์ที่มีปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในปริมาณสูงกว่ามีกำลังอัดสูงกว่าแต่มีอัตราการเพิ่มกำลังอัดที่เป็นผลจากการใช้สารละลาย NaOH น้อยกว่า อย่างไรก็ตามการใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงถึง 1.5 โมลาร์กลับส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลง โดยเป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งกลุ่มที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์สูงและปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำ ซึ่งอาจเกิดจากสารละลาย NaOH ความเข้มข้นสูงเร่งให้เกิดผลึก Sodium Carbonate ซึ่งทำให้เกิดความพรุนและลดความแน่นของเจลในมอร์ตาร์ทำให้กำลังอัดลดลงตามระยะเวลาการบ่มได้ [15]

ตารางที่ 4 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ส่วนผสม	กำลังอัดมอร์ตาร์ (กก./ cm^2)		
	14 วัน	28 วัน	56 วัน
I80_F30:P70	157	185	215
I80_F30:P70_0.25M	163	194	242
I80_F30:P70_0.50M	171	198	251
I80_F30:P70_1.00M	189	215	264
I80_F30:P70_1.50M	168	194	249
I60_F30:P70	93	115	147
I60_F30:P70_0.25M	125	132	178
I60_F30:P70_0.50M	137	145	189
I60_F70:P30_1.00M	167	198	214
I60_F70:P30_1.50M	134	142	203

4. สรุปผลการทดลอง

การเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบดในมอร์ตาร์ ส่งผลให้กำลังอัดลดลงในช่วงอายุบ่มต้น ๆ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีบทบาทหลักต่อกำลังอัดในช่วงต้น ขณะที่ในระยะยาวส่วนผสมที่มีสัดส่วนวัสดุปอซโซลานสูง (เถ้าถ่านหินผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน) สามารถพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงอายุ 28-56 วัน อันเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลาน นอกจากนี้การใช้ NaOH ความเข้มข้นไม่เกิน 1.0 โมลาร์ ช่วยเพิ่มกำลังอัดได้ชัดเจน โดยเฉพาะในส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์ต่ำ (เพิ่มขึ้นร้อยละ 45.6) เทียบกับส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์สูง (เพิ่มขึ้นร้อยละ 22.7) อย่างไรก็ตามการเพิ่ม NaOH เป็น 1.5 โมลาร์ กลับทำให้กำลังอัดต่ำลงเมื่อเทียบกับการใช้ NaOH ที่ 1.00 โมลาร์ จากผลการศึกษารังนี้เสนอแนะให้ใช้ส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์ ร้อยละ 60 และเถ้าถ่านหินต่อเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตรา 30:70 สำหรับงานที่ไม่เน้นรับแรง เช่น ผนังหรือคอนกรีตบล็อกปูพื้น (กำลังอัดเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 159 กก./ซม²) ขณะที่ส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์ ร้อยละ 80 และอัตราเถ้าถ่านหินต่อเถ้าปาล์ม 70:30 ซึ่งมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน 333 กก./ซม² สามารถใช้สำหรับงานโครงสร้าง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทูสนับสนุนการวิจัย จากมหาวิทยาลัยบูรพา “งบประมาณเงินอุดหนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund ปีงบประมาณ พ.ศ. 2567” เลขที่สัญญา ววน. 73/2567

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Pitikhunpongsuk and S. Prawerathang, “Potential uses of cement-mixed sugar cane bagasse ash in substitution materials for road construction works,” *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 31, no. 2, pp. 93–103, Apr.–Jun. 2020 (in Thai).
- [2] P. Sornchomkaew, D. Intarabut, and P. Pongsopha, “Improvement of lateritic soil with oil palm ash, dust stone, and cement to develop road surface materials,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 4, pp. 1–12, Oct.–Dec. 2025. (in Thai).
- [3] K. Yongsatar and C. Chusakul, “The use of palm oil ash in high strength concrete,” *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, vol. 20, no. 1, pp. 74–82, Jan.–Apr. 2018 (in Thai).
- [4] W. Chalee, T. Cheewaket, and C. Jaturapitakkul, “Enhanced durability of concrete with palm oil fuel ash in a marine environment,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 13, pp. 128–137, 2021.
- [5] H. M. Hamada, G. A. Jokhio, F. M. Yahaya, A. M. Humada, and Y. Gul, “The present state of the use of Palm Oil Fuel Ash (POFA) in concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 175, pp. 26–40, 2018.
- [6] T. Cheewaket, N. Tonglom, A. Tessoongnern, and W. Chalee, “Effect of calcium hydroxide solution on compressive strength of mortar using high volume fly ash as a binder,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no. 1, pp. 35–44, Jan.–Mar. 2020 (in Thai).
- [7] R. Soeurt and W. Chalee, “The influence of NaOH concentration on compressive strength of fly ash concrete,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 27, no. 4, pp. 737–749, Oct.–Dec. 2017 (in Thai).
- [8] W. Kunther, S. Ferreira, and J. Skibsted, “Influence of the Ca/Si ratio on the compressive strength of cementitious calcium-silicate-hydrate binders,” *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 5, pp. 17401–17412, 2017.



- [9] Thai Industrial Standards Institute (TISI). TIS 2594–2567: Hydraulic Cement. Bangkok: Ministry of Industry, 2025 (in Thai).
- [10] ASTM C618-19, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [11] ASTM C109/C109M-21, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
- [12] N. Makaratat, P. Norrarat, C. Jaturapitakkul, and S. Songpiriyakij, “Influence of high volume ternary blend from fly ash and ground granulated blast furnace slag on concrete properties,” *Journal of Thailand Concrete Association*, vol. 7, no. 2, pp. 1–13, Jul.–Dec. 2019 (in Thai).
- [13] J.-C. Liu, M. U. Hossain, S. T. Ng, and H. Ye, “High-performance green concrete with high-volume natural pozzolan: Mechanical, carbon emission and cost analysis,” *Journal of Building Engineering*, vol. 68, 2023, doi: 10.1016/j.jobbe.2023.106087
- [14] W. Chalee, R. Soeurt, P. Pachana, and S. Songpiriyakij, “Improvement of high-volume fly ash cementitious material using single alkali activation,” *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 15, Article ID 44, 2021, doi: 10.1186/s40069-021-00482-9
- [15] J. Temuujin, A. Minjigmaa, W. D. A. Rickard, M. Lee, and A. van Riessen, “Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 167, no. 1–3, pp. 82–88, 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.12.121