วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 31, ฉบับที่ 2 เม.ย.–มิ.ย. 2564
The Journal of KMUTNB., Vol. 31, No. 2, Apr.–Jun. 2021

บทความวิจัย

ผลของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินปริมาณสูงเป็นวัสดุประสาน

เที่ยง ชีวะเกตุ นิติเทพ ทองหลอม อานนท์ เทศสูงเนิน และ วิเชียร ชาลี*
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 9791 5171 อีเมล: wichian@buu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.12.007
รับเมื่อ 27 เมษายน 2563 แก้ไขเมื่อ 1 พฤษภาคม 2563 ตอบรับเมื่อ 4 มิถุนายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 14 ธันวาคม 2563
© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินปริมาณสูงเป็นวัสดุประสาน โดยแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 70, 80 และ 90 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เข้มข้นเท่ากับร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ผสมในมอร์ตาร์เพื่อเป็นสารเร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน ผลการศึกษาพบว่า การใช้ปริมาณเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลง โดยเฉพาะในช่วงอายุต้นของการบ่ม อย่างไรก็ตามการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงขึ้น โดยเฉพาะที่อายุบ่มที่นานขึ้น โดยการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ในมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหิน ร้อยละ 80 และ 90 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถเพิ่มกำลังอัดในมอร์ตาร์ได้มากกว่าส่วนผสมที่ไม่ได้ใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ถึงร้อยละ 32 และ 37 ตามลำดับ

คำสำคัญ: มอร์ตาร์ เถ้าถ่านหิน กำลังอัด แคลเซียมไฮดรอกไซด์ อายุบ่ม

การอ้างอิงบทความ: เที่ยง ชีวะเกตุ, นิติเทพ ทองหลอม, อานนท์ เทศสูงเนิน และ วิเชียร ชาลี, "ผลของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินปริมาณสูงเป็นวัสดุประสาน," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 31, ฉบับที่ 2, หน้า 278–287, เม.ย.–มิ.ย. 2564.

Research Article

Effect of Calcium Hydroxide Solution on Compressive Strength of Mortar Using High Volume Fly Ash as a Binder

Tieng Cheewaket, Nititep Tonglom, Anon Tessoongnern and Wichian Chalee*
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chon Buri, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 9791 5171, E–mail: wichian@buu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.12.007
Received 27 April 2020; Revised 1 June 2020; Accepted 4 June 2020; Published online: 14 December 2020
© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The objective of this research is to study the effect of the concentration of calcium hydroxide solution on compressive strength of the mortar using high volume of fly ash as a binder. Fly ash was used to replace Portland cement type I at 70, 80 and 90% by weight of binder. Various $Ca(OH)_2$ concentrations of 0, 5, 10, 15 and 20% by weight were mixed and used as an alkaline activator of pozzolanic reaction in fly ash mortar. The results showed that the compressive strength of fly ash mortars decreased with the increase of fly ash replacement, especially at the early age of curing. However, using $Ca(OH)_2$ with concentration of not more than 10% by weight as an activator of pozzolanic reaction resulted in the increase of compressive strength of fly ash mortar, especially over longer curing period. The results also revealed that the use of $Ca(OH)_2$ solution with concentrations of 5 and 10% by weight in high volume fly ash mortars containing fly ash 80 and 90% by weight of binder could yield larger compressive strengths than the mortars without any $Ca(OH)_2$ solution presented by 32 and 37%, respectively.

Keywords: Mortar, Fly Ash, Compressive Strength, Calcium Hydroxide, Curing Age

Please cite this article as: 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. 31, no. 2, pp. 278–287, Apr.–Jun. 2021 (in Thai).

1. บทนำ

ปัจจุบันปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ถูกใช้เป็นวัสดุประสานอย่างแพร่หลายในงานคอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้จากการเผาสารที่ประกอบด้วย ออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียม เป็นหลัก อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอยู่ในช่วง 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงต้องใช้พลังงานสูงมากในการระเบิดวัสดุ การย่อย การลำเลียง การเผา และการบดละเอียด ผลกระทบที่เกิดจากการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้เกิดการปล่อยก๊าซที่มีผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก เทคโนโลยีด้านคอนกรีตได้พยายามหาวัสดุทดแทน เพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง ตลอดจนเป็นการส่งเสริมให้ใช้วัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมหลายชนิดมาสร้างมูลค่าให้กับอุตสาหกรรมก่อสร้างอีกด้วย

ปอซโซลาน เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีต หรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อทำงานได้ง่ายขึ้น [1]–[3] เถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมหลายชนิด เป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีและสามารถพัฒนาเพื่อใช้ในงานคอนกรีตได้ ทั้งนี้ ต้องมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่สมบูรณ์ ได้แก่ เป็นเถ้าที่มีออกไซด์ของซิลิกา หรือซิลิกาและอะลูมินาสูง มีความละเอียดสูงหรือสามารถที่จะบดให้ละเอียดได้ง่ายโดยใช้ต้นทุนต่ำ ตลอดจนไม่เป็นผลึกซึ่งส่งผลให้สามารถทำปฏิกิริยากับด่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ดี ซึ่งเถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เข้าข่ายในลักษณะข้างต้น ได้แก่ เถ้าถ่านหิน เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าแกลบ และเถ้าชานอ้อย [4], [5]

ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดจากสารประกอบของซิลิกาและอะลูมินาที่อยู่ในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ [6], [7] โดยการใช้วัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตยังจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมร่วมด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาวัสดุประสานจากเถ้าถ่านหิน ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพดีชนิดหนึ่ง โดยใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากแหล่งภายนอกร่วมทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าถ่านหิน ทั้งนี้ เพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานให้สมบูรณ์มากขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตวัสดุประสานโดยใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงมากขึ้น ถ้าแนวทางกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลานดังกล่าวมีผลให้วัสดุประสานมีสมบัติรับแรงเชิงได้ดีขึ้น จะเป็นการส่งเสริมการใช้เถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อเป็นวัสดุปอซโซลานในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตได้มากขึ้น และสามารถต่อยอดงานวิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระแสไฟฟ้าอื่นๆที่มีคุณภาพต่ำ และมีปัญหาเรื่องการกำจัดทิ้ง ให้มีศักยภาพเป็นวัสดุประสานในทางวิศวกรรมและสามารถใช้งานได้อย่างเป็นรูปธรรมมากขึ้น

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุประสานและมวลรวม

วัสดุประสานที่ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 [8] สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และเถ้าถ่านหิน โดยใช้เถ้าถ่านหินที่ได้จากโรงงานโดยตรง มีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ในปริมาณร้อยละ 31.6 ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหิน เท่ากับ 2.20 สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบด้วย SiO_2, Al_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 72.2 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหินชนิด F ตามมาตรา ASTM C 618 [9] องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แสดงดังตารางที่ 1 มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.63 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.72 และโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.68

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)	
	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน
Silicon dioxide; SiO_2	20.10	35.20
Aluminum oxide; Al_2O_3	5.20	19.20
Iron oxide; Fe_2O_3	3.15	17.81
Calcium oxide; CaO	60.24	16.65
Magnesium oxide; MgO	1.13	-
Sulfur trioxide; SO_3	0.11	0.63
Other oxides	0.43	2.44
LOI.	2.42	1.50

2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ได้ใช้ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนระหว่างวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับเถ้าถ่านหิน) ต่อทราย เท่ากับ 1 : 2.75 โดยน้ำหนัก ใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นเท่ากับร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก แต่ละความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 70, 80 และ 90 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยควบคุมค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 110±5 ส่วนผสมมอร์ตาร์ควบคุมและส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เร่งปฏิกิริยา แสดงดังตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ หล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ ขนาด 50 × 50 × 50 มม^3 เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่มในน้ำเป็นเวลา 3, 7, 14, 28 และ 56 วัน การเตรียมตัวอย่างทดสอบแสดงดังรูปที่ 1 (ก) และการวิบัติของมอร์ตาร์เนื่องจากกำลังอัดดังรูปที่ 1 (ข) ซึ่งพบว่าทุกส่วนผสมมีการวิบัติในลักษณะแรงเฉือนเป็นรูปกรวยคู่ที่มีปลายกรวยอยู่กึ่งกลางของมอร์ตาร์ ซึ่งเป็นลักษณะการวิบัติของมอร์ตาร์เนื่องจากกำลังอัดโดยทั่วไป

ตารางที่ 2 ส่วนผสมมอร์ตาร์ควบคุม

ส่วนผสม	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก			
	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน	ทราย	น้ำ
IF70	0.30	0.70	2.75	0.77
IF80	0.20	0.80	2.75	0.82
IF90	0.10	0.90	2.75	0.86

ตารางที่ 3 ส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ส่วนผสม	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก			
	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1	เถ้าถ่านหิน	ทราย	สารละลาย $Ca(OH)_2$
IF70–5%	0.30	0.70	2.75	0.79
IF70–10%	0.30	0.70	2.75	0.80
IF70–15%	0.30	0.70	2.75	0.90
IF70–20%	0.30	0.70	2.75	1.08
IF80–5%	0.20	0.80	2.75	0.90
IF80–10%	0.20	0.80	2.75	0.98
IF80–15%	0.20	0.80	2.75	1.09
IF80–20%	0.20	0.80	2.75	1.11
IF90–5%	0.10	0.90	2.75	0.88
IF90–10%	0.10	0.90	2.75	0.95
IF90–15%	0.10	0.90	2.75	1.09
IF90–20%	0.10	0.90	2.75	1.15

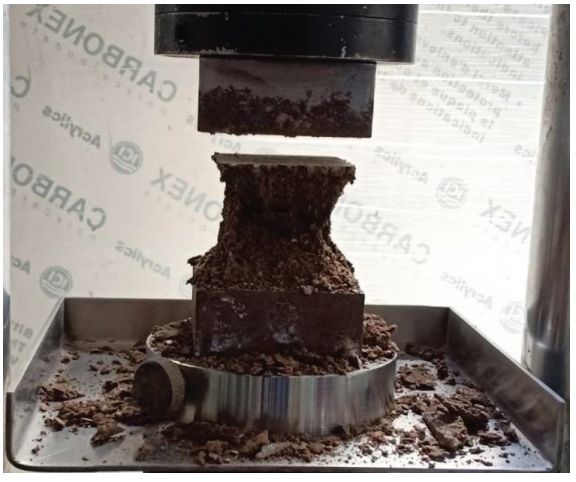
หมายเหตุ: "I" หมายถึงมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน
"F" หมายถึง เถ้าถ่านหิน
"70, 80, 90" หมายถึง ร้อยละที่แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินโดยน้ำหนักวัสดุประสาน
"5% ถึง 20%" หมายถึง ร้อยละความเข้มข้นของสารละลาย $Ca(OH)_2$ โดยน้ำหนัก

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลของความความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

ผลทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่มต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินและใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการเร่งปฏิกิริยา ที่อายุบ่มมอร์ตาร์ 3, 14, 28 และ 56 วัน ดังรูปที่ 2 (ก)–(ง) ตามลำดับ พบว่า ที่ช่วงอายุต้น (อายุ 3 วัน) ดังรูป 2 (ก) มอร์ตาร์ทุกส่วนผสมมีกำลังอัดที่ต่ำและใกล้เคียงกัน โดยไม่สามารถวิเคราะห์ถึงผลของการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ต่อกำลังของมอร์ตาร์ได้ และโดยภาพรวมพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูงขึ้น มีกำลังอัดต่ำลง โดยเฉพาะในกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้ผสมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทั้งนี้ เนื่องจากที่อายุต้นๆ ของการบ่มกำลังอัดของมอร์ตาร์จะขึ้นกับปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเป็นหลัก [10] โดยส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

(ก) การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์เพื่อทดสอบกำลังอัด



(ข) การวิบัติของมอร์ตาร์เนื่องจากกำลังอัด

รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์และการวิบัติของมอร์ตาร์เนื่องจากกำลังอัด

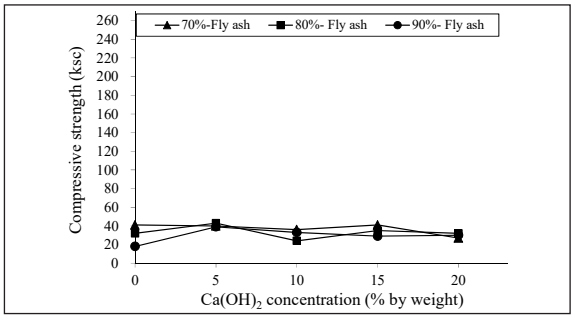
มีปริมาณปูนซีเมนต์ค่อนข้างน้อย กำลังอัดของมอร์ตาร์จึงมีค่าต่ำอย่างชัดเจน

เมื่อพิจารณาที่อายุการบ่มนานขึ้นเป็น 14 วัน เริ่มเห็นผลของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ โดยกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดลดลงเมื่อใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น โดยกำลังอัดของมอร์ตาร์ต่ำกว่ากลุ่มควบคุมในทุกกลุ่มที่ผสมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ส่วนกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูงขึ้นเป็นเป็นร้อยละ 80 และ 90 โดยน้ำหนักวัสดุประสานกลับพบว่า มอร์ตาร์ที่ผสม

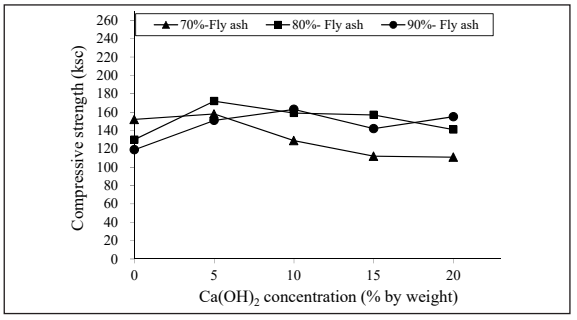
ตารางที่ 4 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินและใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เร่งปฏิกิริยา

ส่วนผสม	กำลังอัด (กก./ซม.^{2})					กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุม (ร้อยละ)
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน	
IF 70	41	66	102	152	177	100
IF 70–5	40	88	98	158	172	104
IF 70–10	36	70	113	129	187	85
IF 70–15	41	65	104	112	158	74
IF 70–20	27	57	82	111	106	73
IF 80	32	60	95	130	132	100
IF 80–5	43	100	117	172	234	132
IF 80–10	24	57	102	159	222	122
IF 80–15	35	97	145	157	226	121
IF 80–20	32	68	114	141	194	108
IF 90	18	59	93	119	123	100
IF 90–5	39	52	103	151	179	127
IF 90–10	33	81	118	163	212	137
IF 90–15	29	49	115	142	182	119
IF 90–20	30	66	114	155	199	130

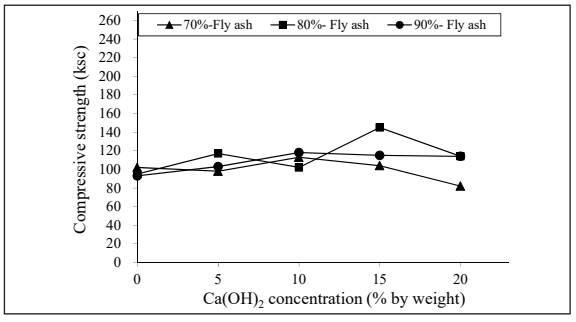
สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทุกส่วนผสมให้กำลังอัดที่อายุ 14 วัน สูงกว่ากลุ่มควบคุม และมีแนวโน้มชัดเจนมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่อายุ 28 วัน [รูป 2 (ค)] โดยพบว่า กลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมในมอร์ตาร์ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงสุดเท่ากับ 172 กก./ซม.^{2} เมื่อใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างชัดเจน ส่วนการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงกว่านี้ ไม่มีผลต่อการเพิ่มของกำลังอัด เมื่อพิจารณามอร์ตาร์กลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินปริมาณสูงถึงร้อยละ 90 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่า มีแนวโน้มคล้ายกับกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 80 โดยทุกกลุ่มที่ผสมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ให้กำลังอัดสูงกว่ากลุ่มควบคุม โดยการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน สูงขึ้นและมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สูงถึงร้อยละ 15 และ 20 โดยน้ำหนัก เช่น มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 90 โดย



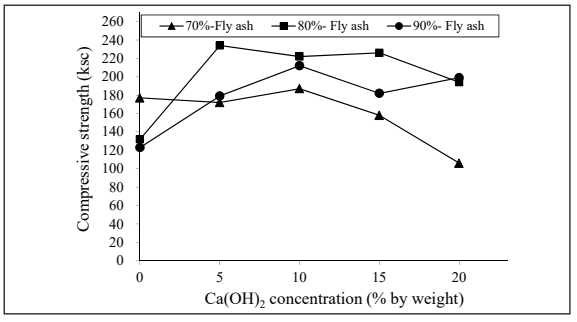
(ก) อายุบ่ม 3 วัน



(ค) อายุบ่ม 28 วัน



(ข) อายุบ่ม 14 วัน



(ง) อายุบ่ม 56 วัน

รูปที่ 2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

น้ำหนักวัสดุประสานและใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 119, 151, 163, 142 และ 155 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ โดยผลดังกล่าวมีแนวโน้มชัดเจนมากขึ้นที่อายุมอร์ตาร์ 56 วัน ดังรูปที่ 2 (ง) ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินปริมาณสูงอย่างมีนัยสำคัญ และเห็นผลชัดเจนที่อายุมอร์ตาร์นานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นและพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุที่นานขึ้น

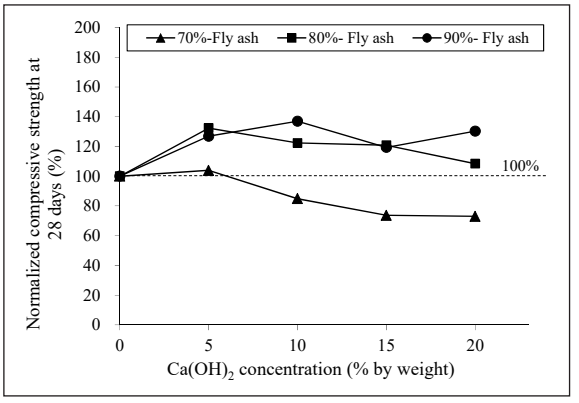
นอกจากนั้น การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นมีความเหมาะสมในส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินมากขึ้น โดยพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินผสมในมอร์ตาร์ร้อยละ 80 ต้องการสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เพื่อให้ได้กำลังอัดสูงสุด และเมื่อผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นเป็นร้อยละ 90 กำลังอัดสูงสุดของมอร์ตาร์กลุ่มนี้ต้องการสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นสูงเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ส่วนความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่สูงกว่าร้อยละ 10 ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน เพราะไม่มีผลทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น และส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น เนื่องจากใช้ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมมากขึ้น ผลดังกล่าวอาจเกิดจากการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มาจากแหล่งภายนอกในความเข้มข้นดังกล่าว มีความเหมาะสมและสามารถเพิ่มด่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่นอกเหนือจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ให้เข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับซิลิกาและอะลูมินา ที่ส่งผลให้ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตที่ให้กำลังกับวัสดุประสานได้ดี [11]–[13] ส่วนความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่สูงมากไปอาจมีปริมาณ

ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เกินจำเป็นที่ส่งผลทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงได้ ส่วนกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินร้อยละ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสานกลับพบว่า การใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงและต่ำกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ มอร์ตาร์กลุ่มนี้จึงไม่เหมาะสมที่จะพัฒนาเป็นส่วนผสมโดยใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้าง

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ ในรูปของร้อยละกำลังอัดเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 28 วัน ดังตารางที่ 4 และรูปที่ 3 พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินร้อยละ 80 และ 90 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุมมากกว่าร้อยละ 100 ในทุกส่วนผสมที่ใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินร้อยละ 80 และ 90 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุมสูงสุด เมื่อใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุมเท่ากับ 132 และ 137 ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงถึงประสิทธิภาพของการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นเหมาะสมในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในวัสดุประสานที่ใช้เถ้าถ่านหินปริมาณสูง โดยสามารถเพิ่มกำลังอัดในมอร์ตาร์ได้มากกว่าร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ไม่ได้ผสมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์

3.2 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

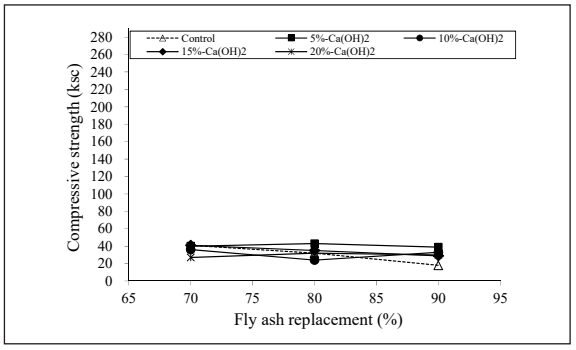
เมื่อพิจารณาผลของการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ ที่อายุการบ่ม 3, 14, 28 และ 56 วัน ดังรูปที่ 4 (ก)–(ง) ตามลำดับ พบว่า การแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้มอร์ตาร์ควบคุมที่ไม่ได้ใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีกำลังอัดลดลงอย่างชัดเจนและมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกอายุการทดสอบ เช่น มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 70 (IF70), 80 (IF80), 90 (IF90) โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้



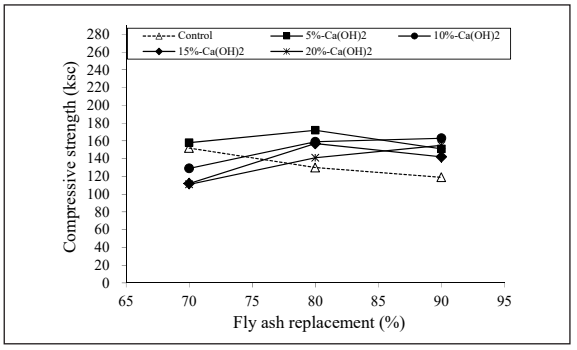
รูปที่ 3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ต่อร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุม

กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 152, 130, 119 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ ผลดังกล่าวเกิดจากปริมาณเถ้าถ่านหินที่สูงขึ้นทำให้ลดปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำลดลงด้วย โดยสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [14] ที่พบว่า กำลังของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินปริมาณสูงจะลดลงอย่างมากในช่วงอายุต้น โดยการศึกษาครั้งนี้ ได้แทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณสูงมาก จึงทำให้ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลต่อการเพิ่มของกำลังอัดของมอร์ตาร์น้อยกว่าผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงอายุต้น

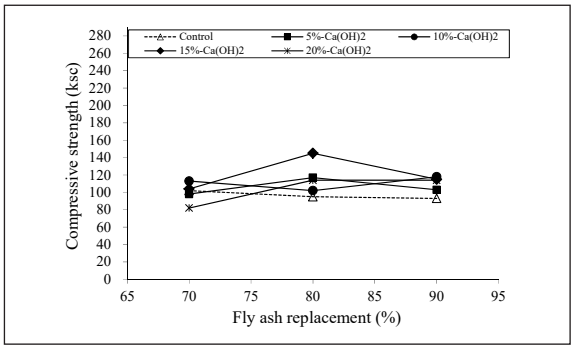
การใช้เถ้าถ่านหินผสมมอร์ตาร์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 70 เป็น 90 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในกลุ่มที่ใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีแนวโน้มให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงขึ้น โดยเฉพาะที่อายุมอร์ตาร์นานขึ้น เช่น กลุ่มที่ใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากร้อยละ 70 เป็นร้อยละ 80 โดยนำหนักวัสดุประสาน กลับส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นได้ (เพิ่มจาก 159 กก./ซม.^{2} ในมอร์ตาร์ IF70-5 เป็น 172 กก./ซม.^{2} ในมอร์ตาร์ IF80-5) ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำปฏิกิริยากับอะลูมินา



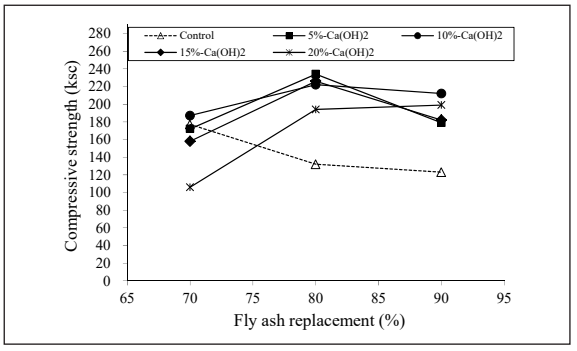
(ก) อายุบ่ม 3 วัน



(ค) อายุบ่ม 28 วัน



(ข) อายุบ่ม 14 วัน



(ง) อายุบ่ม 56 วัน

รูปที่ 4 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

และซิลิกาในเถ้าถ่านหินของปฏิกิริยาปอซโซลาน ได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ที่ให้กำลังกับมอร์ตาร์ได้ดีขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นเหมาะสม สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในมอร์ตาร์ที่ผสมวัสดุปอซโซลานปริมาณสูงได้ดีมากขึ้น

การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก สามารถเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในส่วนผสมของมอร์ตาร์ ที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงถึงร้อยละ 90 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้มีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินร้อยละ 70 ได้ โดยผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดที่ลดลง เนื่องจากการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ลงร้อยละ 20 สามารถชดเชยได้โดยการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ยิ่งกว่านั้นยังทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นอีกด้วย โดยมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดที่อายุ 56 วัน เท่ากับ 177 กก./ซม.^{2} เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสมเป็นร้อยละ 90 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน พบว่า มีกำลังอัดที่อายุเดียวกัน เท่ากับ 212 กก./ซม.^{2} อย่างไรก็ตาม กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ส่วนผสมดังกล่าว ยังไม่สามารถพัฒนาเพื่อใช้เป็นคอนกรีตโครงสร้างได้ เนื่องจากกำลังอัดที่ได้ค่อนข้างต่ำ แต่สามารถประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุก่อสร้างชนิดอื่นที่ต้องการกำลังรับแรงเชิงกลไม่สูงมาก เช่น คอนกรีตบล็อกปูพื้น บล็อกก่อผนัง หรือวัสดุประสานในงานก่อฉาบ

4. สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในทุกส่วนผสมมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมที่ไม่ได้ผสมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยเห็นผลชัดเจนที่อายุมอร์ตาร์มากกว่า 28 วัน

2) สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มากที่สุด และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินเป็นร้อยละ 90 โดยน้ำหนักวัสดุประสานพบว่า ต้องการสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

3) การใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ในมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหิน ร้อยละ 80 และ 90 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถเพิ่มกำลังอัดในมอร์ตาร์ได้มากกว่าส่วนผสมที่ไม่ได้ใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ถึงร้อยละ 32 และ 37 ตามลำดับ

4) การใช้เถ้าถ่านหินผสมในมอร์ตาร์ในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ลดกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่ใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ อย่างชัดเจน ขณะที่กลุ่มที่ใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีแนวโน้มให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงขึ้น โดยเฉพาะที่อายุมอร์ตาร์นานขึ้น (อายุ 28 และ 56 วัน)

5) การใช้เถ้าถ่านหินในมอร์ตาร์ในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ต้องการสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น แต่ไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เพื่อเพิ่มกำลังอัดให้กับมอร์ตาร์

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนโครงการวิจัย สำหรับนิสิตปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

เอกสารอ้างอิง

[1] K. Charoenprom and W. Chalee, “Relation between water permeability and chloride diffusion coefficient of concrete under 10-year exposure in marine environment,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 23, no. 1, pp. 29–41, 2013 (in Thai).

[2] B. Ma, X. Liu, H. Tan, T. Zhang, J. Mei, H. Qi, W. Jiang, and F. Zou, “Utilization of pretreated fly ash to enhance the chloride binding capacity of cement-based material,” *Construction and Building Materials*, vol. 175, pp. 726–734, 2018.

[3] K. Muthusamy, J. Mirza, N. A. Zamri, M. W. Hussin, A. P. P. Abdul Majeed, A. Kusbiantoro, and A. M. Albshir Budiea, “Properties of high strength palm oil clinker lightweight concrete containing palm oil fuel ash in tropical climate,” *Construction and Building Materials*, vol. 199, pp.163–177, 2019.

[4] 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.

[5] U. Chatveera and P. Srinourn, “A study of properties of mortar portland cement type V mixed with ground rice husk ash and limestone powder,” *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 35, no. 2, pp. 201–218, 2012 (in Thai).

[6] P. Chindaprasirt and C. Jaturapitakkul, “Cement, pozzolan and concrete,” *Thailand Concrete Association*, pp. 11–13, and pp. 238–240, 2008 (in Thai).

[7] C. Shi and RL. Day, “Comparison of different

methods for enhancing reactivity of pozzolans," *Cement and Concrete Research*, vol. 31, no. 5, pp. 813–818, 2001.

[8] *Standard Specification for Portland cement*, ASTM Standards C 150-07, 2019.

[9] *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM Standards C618-19, 2019.

[10] V. Sata, C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol, "Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 7, pp. 1589–1598, 2007.

[11] P. Chindapasirt, C. Jaturapitakkul, and T. Sinsiri, "Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste," *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, no. 4, pp. 425–428, 2005.

[12] R. Soeurt and W. Chalee, "Compressive strength improvement of concrete containing rice husk ash using an alkaline activator," *The Journal of KMUTNB*, vol. 26, no. 3, pp. 347–357, 2016 (in Thai).

[13] 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, 2017 (in Thai).

[14] M. Thomas, *Optimizing the use of fly ash in concrete*, Portland Cement Association, IS. 548, 2007, pp. 1–24.