กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน

Compressive Strength of Mortar by the Partial Replacement of Portland Cement with Calcined Clay and Limestone

ธัญวรัตม์ สันติสุทธิกุล[1] ธีระวุฒิ มูฮำหมัด[2] และ ชูชัย สุจิวรกุล[3,*]

[1,2,3] สาขาวิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร

**Corresponding author; E-mail address: chuchai.suj@kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) ตัวแปรที่ใช้ศึกษาคือ ปริมาณการแทนที่ LC^2 ที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 15 30 และ 50 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และทำการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในส่วนผสมของมอร์ตาร์ โดยทำการควบคุมค่าการไหลตัวให้อยู่ในระหว่างร้อยละ 105–115 ตามมาตรฐาน ASTM C1437 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัดเป็นลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยทำการทดสอบที่อายุของมอร์ตาร์เท่ากับ 7 14 และ 28 วัน จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อมีการแทนที่ LC^2 ที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ส่วนผสมต้องการน้ำมากขึ้น เพื่อให้การไหลตัวของมอร์ตาร์มีค่าเท่าเดิม และกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) มีการพัฒนามากขึ้นตามอายุการบ่ม นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมีการแทนที่ LC^2 ในปริมาณมากคือร้อยละ 50 จะทำให้กำลังอัดในช่วง 7 วันแรกจะลดลง และตัวอย่างที่มีกำลังอัดสูงสุด คือตัวอย่างที่มีการแทนที่ LC^2 ในปริมาณร้อยละ 30 โดยได้ค่ากำลังอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 73.9 เมกะปาสคาล

คำสำคัญ: Limestone Calcined Clay (LC^2), โคลนเผาบด, ผงฝุ่นหินปูน

Abstract

This research studied the compressive strength of mortar by the partial replacement of Portland cement with Calcined Clay and Limestone (LC^2). Investigated parameters consisted of three different levels replacement of cement with LC^2, i.e. 15% 30% and 50% by weight of cement and to determine the appropriate water content in the mortar by controlling the flowability to be between 105-115% according to ASTM C1437 Standard. Specimens for the compressive strength test were 5 cm cubes according to ASTM C109 Standard, whereby they were tested at 7, 14 and 28 days of curing. The results of this study showed that an increase in LC^2 replacement would lead to the need of more water in the mixture in order to keep the same flowability of mortar. Moreover the compressive strength of mortars with partial replacement of cement by ground calcined clay and limestone (LC^2) would improve with curing ages. It was also found that when replacing a large amount of LC^2, i.e. 50%, the compressive strength during the first 7 days was reduced. The samples with the highest compressive strength were obtained when the samples with 30% replacement of LC^2, whereby the compressive strength at 28 days is 73.9 MPa.

Keywords: Limestone Calcined Clay (LC^2), Calcined Clay, Limestone

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญต่อการพัฒนาประเทศในฐานะที่เป็นพื้นฐานในการก่อสร้างทุกประเภท ทำให้ภาคอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เติบโตขึ้นเรื่อย ๆ โดยเฉพาะประเทศที่กำลังพัฒนามีอัตราการใช้ปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้น ตามจำนวนประชากรในประเทศ ในกระบวนการการผลิตปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดภาวะโลกร้อน และปัจจุบันประเทศไทยได้รับผลกระทบอย่างมากในเรื่องของ ฝุ่น PM2.5 เนื่องจากกระบวนการการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้ความร้อนในการเผา ด้วยอุณหภูมิสูงถึง 1200-1450 องศาเซลเซียส โดยการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตันจะส่งผลให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ 0.8 ตัน สาเหตุนี้ทำให้นักวิจัยพยายามหาวิธีลดอัตราการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ วิธีที่จะช่วยลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการผลิตคอนกรีตนั้น คือลดการใช้ปูนซีเมนต์ลง แล้วใช้วัตถุดิบอื่น ๆ เข้ามาแทนที่ปูนซีเมนต์ ที่ผ่านมามีการนำวัสดุปอซโซลานเข้ามาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีองค์ประกอบทางเคมีที่มีส่วนประกอบของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ มากกว่าร้อยละ 70 ในปัจจุบันมี

งานวิจัย[1,2,3,4] ที่ได้ทำการศึกษาโดยการนำวัสดุปอซโซลานหลายชนิดมาแทนที่ปูนซีเมนต์ เช่น เถ้าลอย เถ้าแกลบ ตะกรันเหล็ก ผงฝุ่นซิลิกา เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีวัสดุที่ได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบันอีกอย่างหนึ่งก็คือ โคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) เนื่องจากโคลนเผาบด เป็นการนำดินเหนียวซึ่งเป็นวัสดุทางธรรมชาติที่มีอยู่มากมาย และมีราคาถูก มาเผาที่อุณหภูมิ 850-900 องศาเซลเซียส ทำให้ในขั้นตอนการผลิตโคลนเผาบดเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าการผลิตปูนซีเมนต์ เนื่องจากการใช้เชื้อเพลิงและอุณหภูมิการเผาที่น้อยกว่า [5] โคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) ได้ถูกนำมาแทนที่ในปูนซีเมนต์ โดยถูกเรียกว่า Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ซึ่งปัจจุบัน Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ได้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมในบางประเทศ ได้แก่ ประเทศคิวบา และประเทศอินเดีย [6]

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ LC^3 ในประเทศไทยมีจำนวนที่น้อยมาก ตัวอย่างงานวิจัยในประเทศ ได้แก่ Chanachon Sudswong (2022) [7] ได้ศึกษาเกี่ยวกับ ผลกระทบของโคลนเผาบดที่มีต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์และคอนกรีต จากผลงานวิจัยพบว่า อัตราส่วนของน้ำหนักโคลนเผาบด (Calcined Clay) ต่อผงฝุ่นหินปูน (Limestone powder) ที่ 2 : 1 แสดงผลได้ดีกว่าอัตราส่วน 1 : 1 และการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดเพียงอย่างเดียวและการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) ส่งผลให้มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น แต่เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยโคลนเผาบด ผงฝุ่นหินปูน และเถ้าลอย จะช่วยลดความต้องการน้ำ เมื่อเทียบกับการแทนที่โคลนเผาบดเพียงอย่างเดียวและการแทนที่โคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2)

ทางผู้วิจัยจึงได้สนใจที่จะทำการศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) และการหาปริมาณน้ำและสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ส่วนผสมดังกล่าวนี้จะถูกนำมาใช้ในการพัฒนาแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยที่มีความต้องการค่าการไหลตัวที่สูง

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) และการหาปริมาณน้ำและสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3)

3. วิธีการศึกษาวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.1.2 โคลนเผาบด (Calcined Clay) ซึ่งได้มาจากบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (SCG) ซึ่งเป็นดินเหนียว (ไม่ระบุแหล่ง) ที่ถูกเผาด้วยอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ผสมกับยิปซั่มในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

3.1.3 ผงฝุ่นหินปูน (Limestone powder) ซึ่งได้มาจากการระเบิดภูเขา จังหวัดสระบุรี มีขนาด 10 ไมครอน

3.1.4 ทรายละเอียด ซึ่งได้มาจากจังหวัดระยอง

3.1.5 สารลดน้ำพิเศษ ยี่ห้อ Sika® ViscoCrete®-10 โดยเป็นสารละลายดัดแปลงจำพวกโพลีคาร์บอกซีเลท

(ก) โคลนเผาบด (ข) ผงฝุ่นหินปูน

รูปที่ 1 วัสดุ Limestone Calcined Clay (LC^2) ที่ใช้ในการวิจัย

3.2 อัตราส่วนผสม

อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) ในปริมาณร้อยละ 15, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ซึ่งมีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 1 และมีอัตราส่วนของน้ำหนักโคลนเผาบด (Calcined Clay) ต่อผงฝุ่นหินปูน (Limestone powder) เท่ากับ 2 : 1 สำหรับตัวอย่างของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่ไม่ได้เติมสารลดน้ำพิเศษ หาปริมาณน้ำที่เหมาะสมได้โดยทำการควบคุมค่าการไหลตัวของมอร์ตาร์ให้อยู่ในระหว่างร้อยละ 105–115 ตามมาตรฐาน ASTM C1437 [8] และสำหรับตัวอย่างของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่เติมสารลดน้ำพิเศษ หาปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมได้โดยควบคุมอัตราส่วนของน้ำหนักน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35 และควบคุมค่าการไหลตัวของมอร์ตาร์ให้อยู่ในระหว่างร้อยละ 105 ถึง 115 ตามมาตรฐาน ASTM C1437 [8]

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบ

Mix	Cement	LC^2	Sand	W/B	Superplasticizer
Control	1	-	1	0.45	-
15LC2	0.85	0.15	1	0.45	-
30LC2	0.7	0.3	1	0.5	-
50LC2	0.5	0.5	1	0.5	-
15LC2-0.0035SP	0.85	0.15	1	0.35	0.0035
30LC2-0.007SP	0.7	0.3	1	0.35	0.007
50LC2-0.015SP	0.5	0.5	1	0.35	0.015

3.3 การทดสอบ

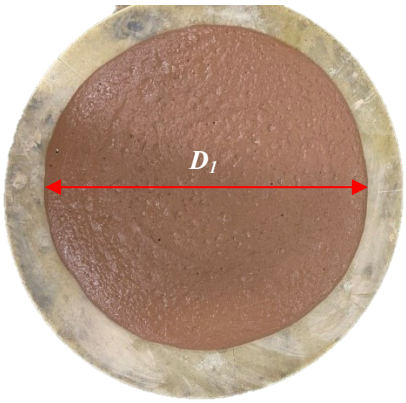
3.3.1 การทดสอบหาค่าการไหลของมอร์ตาร์

การทดสอบหาค่าการไหลของมอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1437[8] โดยใช้เครื่องทดสอบ Flow Table ร้อยละการไหลแผ่ของตัวอย่างคำนวณจากสมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละการไหลแผ่} = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \cdot 100 \quad (1)$$

เมื่อ D_0 = เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในที่ฐานของแบบ

D_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่กระจายบนแท่น



รูปที่ 2 การไหลแผ่ของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3)

3.3.2 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C109 [9] ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัดเป็นลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร และทำการทดสอบกำลังอัดในช่วงอายุการบ่มตัวอย่างที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน

รูปที่ 3 ตัวอย่างของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3)

4. ผลการวิจัย

4.1 ปริมาณน้ำและสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3)

การเตรียมตัวอย่าง แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกเป็นตัวอย่างของ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่ไม่ได้เติมสารลดน้ำพิเศษ กลุ่มสองเป็นตัวอย่างของ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่เติมสารลดน้ำพิเศษ

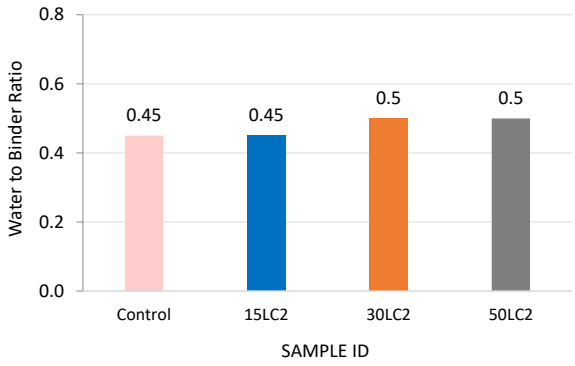
กลุ่มแรก ตัวอย่างของมอร์ต้าร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่ไม่ได้เติมสารลดน้ำพิเศษ ได้ทำการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม โดยควบคุมค่าการไหลตัวของมอร์ต้าร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ให้อยู่ในระหว่างร้อยละ 105 ถึง 115 ตามมาตรฐาน ASTM C1437 [8] จากผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) ในปริมาณร้อยละ 15 เมื่อทำการควบคุมค่าการไหลจะได้อัตราส่วนของน้ำหนักน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45 และตัวอย่างของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) ในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 ได้อัตราส่วนของน้ำหนักน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.5

กลุ่มสอง ตัวอย่างของมอร์ต้าร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่เติมสารลดน้ำพิเศษ ได้ทำการทดสอบหาปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสม โดยควบคุมอัตราส่วนของน้ำหนักน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35 และควบคุมค่าการไหลตัวของมอร์ตาร์ให้อยู่ในระหว่างร้อยละ 105 ถึง 115 ตามมาตรฐาน ASTM C1437 [8] จากผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่างของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) ในปริมาณร้อยละ 15, 30 และ 50 มีอัตราส่วนสารลดน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.0035, 0.007 และ 0.015 ตามลับดับ

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของน้ำ สารลดน้ำ และร้อยละการไหลแผ่

Sample ID	W/B	Superplasticizer	ร้อยละการไหลแผ่
Control	0.45	-	114
15LC2	0.45	-	109
30LC2	0.5	-	108
50LC2	0.5	-	106
15LC2-0.0035SP	0.35	0.0035	111
30LC2-0.007SP	0.35	0.007	109
50LC2-0.015SP	0.35	0.015	105

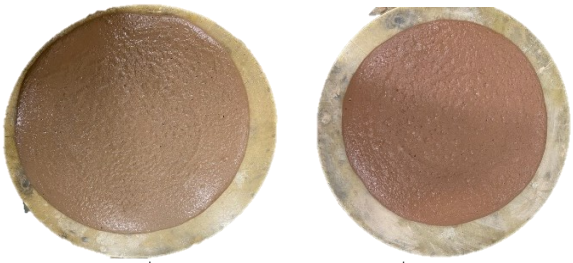
จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า ตัวอย่างของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่ไม่ได้เติมสารลดน้ำพิเศษ เมื่อมีการแทนที่ LC^2 ในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้ตัวอย่างต้องการน้ำมากขึ้น เพื่อให้การไหลตัวของมอร์ตาร์มีค่าเท่าเดิม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yu Chen และคณะ [10] และจากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า ตัวอย่างของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่เติมสารลดน้ำพิเศษ เมื่อมีการแทนที่ LC^2 ในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้ตัวอย่างมีอัตราส่วนของสารลดน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น เพื่อให้การไหลตัวของมอร์ตาร์มีค่าเท่าเดิม ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับตัวอย่างของมอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) ที่ไม่ได้เติมสารลดน้ำพิเศษ



รูปที่ 4 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่ไม่ได้เติมสารลดน้ำพิเศษ

รูปที่ 5 ปริมาณสารลดน้ำที่เหมาะสมของตัวอย่างของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่เติมสารลดน้ำพิเศษ

(ก) Control (ข) การแทนที่ LC^2 ร้อยละ 15



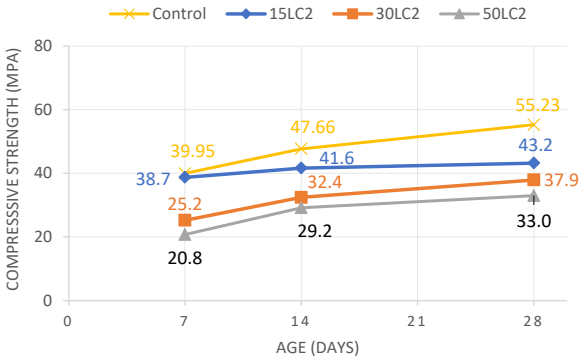
(ค) การแทนที่ LC^2 ร้อยละ 30 (ง) การแทนที่ LC^2 ร้อยละ 50

รูปที่ 6 ตัวอย่างการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3)

4.2 ผลการทดสอบกำลังอัด

4.2.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่ไม่ได้เติมสารลดน้ำพิเศษ

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7 จะเห็นว่า ตัวอย่างควบคุมที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 39.95, 47.66 และ 55.23 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) ในปริมาณร้อยละ 15 ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 38.7, 41.6 และ 43.2 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วย LC^2 ในปริมาณร้อยละ 30 ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 25.2, 32.4 และ 37.9 เมกะปาสคาล ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วย LC^2 ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะกำลังอัดมีค่าลดลง และเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วย LC^2 ในปริมาณร้อยละ 50 ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน มีค่ากำลังอัด เท่ากับ 20.8, 29.2 และ 33 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วย LC^2 ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น กำลังอัดจะมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน

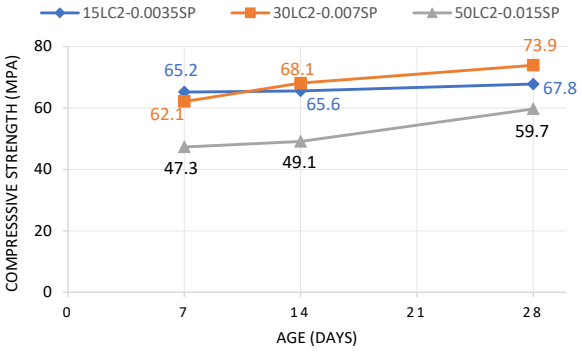


รูปที่ 7 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่ไม่ได้เติมสารลดน้ำพิเศษ

4.2.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่เติมสารลดน้ำพิเศษ

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่เติมสารลดน้ำพิเศษ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 จะเห็นว่า ตัวอย่างของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) ในปริมาณร้อยละ 15 ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 65.2, 65.6 และ 67.8 เมกะปาสคาล ตามลำดับ แต่เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วย LC^2 ในปริมาณร้อยละ 30 ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 62.1, 68.1 และ 73.9 เมกะปาสคาล ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วย LC^2 ในปริมาณร้อย

ละ 50 ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 47.3, 49.1 และ 59.7 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วย LC^2 ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 30 กำลังอัดมีค่าลดลงและมีค่ากำลังอัดน้อยกว่าตัวอย่างของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วย LC^2 ในปริมาณร้อยละ 15 อีกด้วย

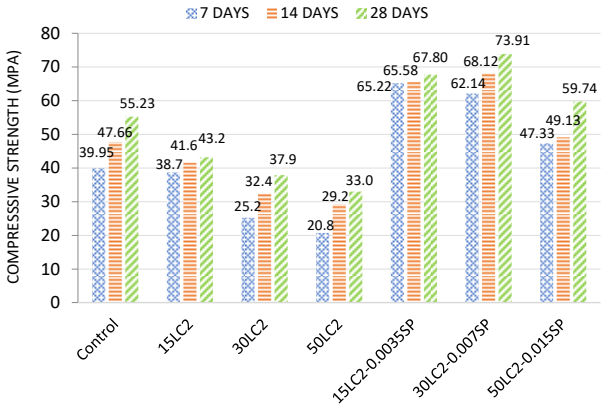


รูปที่ 8 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่เติมสารลดน้ำพิเศษ

จากรูปที่ 8 จะเห็นว่า การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่เติมสารลดน้ำพิเศษในช่วง 7 วันแรก จะขึ้นอยู่กับปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) เมื่อมอร์ตาร์มีปริมาณการแทนที่ LC^2 เพิ่มขึ้น กำลังอัดมีค่าลดลง แต่ในช่วงหลังจาก 14 วัน ตัวอย่างของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) ในปริมาณร้อยละ 15 ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ LC^2 ในปริมาณร้อยละ 15 และ 30

4.2.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3)

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ของตัวอย่างที่เติมสารลดน้ำพิเศษ และไม่ได้เติมสารลดน้ำพิเศษ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ LC^2 ในปริมาณร้อยละที่เท่ากัน ตัวอย่างของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่เติมสารลดน้ำพิเศษ จะมีค่ากำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่ไม่ได้เติมสารลดน้ำอย่างเห็นได้ชัด และตัวอย่างของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่เติมสารลดน้ำพิเศษ จะมีค่ากำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างควบคุม ทุกปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) และตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีกำลังอัดสูงสุด คือตัวอย่างที่ใช้สารลดน้ำพิเศษและมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วย LC^2 ในปริมาณร้อยละ 30 โดยให้ค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน เท่ากับ 73.9 เมกะปาสคาล



รูปที่ 9 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3)

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) ตัวแปรที่ใช้ศึกษาคือ ปริมาณการแทนที่ LC^2 ที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 15, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และทำการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในส่วนผสมของมอร์ตาร์ โดยสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1 สำหรับตัวอย่างที่ไม่ใช้สารลดน้ำพิเศษ มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) ในปริมาณที่มากขึ้น จะใช้อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มมากขึ้น เพื่อทำให้ค่าการไหลตัวของมอร์ตาร์อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ดังนั้นจึงส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลง

5.2 ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีกำลังอัดสูงสุด คือตัวอย่างที่ใช้สารลดน้ำพิเศษและมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วย LC^2 ในปริมาณร้อยละ 30 โดยให้ค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน เท่ากับ 73.9 เมกะปาสคาล

5.3 สำหรับตัวอย่างที่ใช้สารลดน้ำพิเศษ การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์จะขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) โดยสังเกตว่า ตัวอย่างของมอร์ตาร์ที่ใช้ LC^3 ในปริมาณร้อยละ 30 จะพัฒนากำลังในช่วง 7 วันแรก ช้ากว่าตัวอย่างของมอร์ตาร์ที่ใช้ LC^3 ในปริมาณร้อยละ 15 อย่างไรก็ดี กำลังอัดที่อายุ 28 วัน จะมีค่าสูงกว่าหากได้รับการบ่มอย่างต่อเนื่อง

5.4 กำลังอัดของตัวอย่าง Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่เติมสารลดน้ำพิเศษ จะมีค่ากำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างของ Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) ที่ไม่ได้เติมสารลดน้ำพิเศษ ในทุกๆ ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยโคลนเผาบดและผงฝุ่นหินปูน (LC^2) ที่เท่ากัน เนื่องจากปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานลดลง ทำให้มอร์ตาร์มีความพรุนน้อยลงหรือมีเนื้อแน่นมากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย และขอบคุณ Mr.Jeffry Maxfield Lam Po-Lui กรรมการผู้จัดการบริษัท จีอาซี ไทยแลนด์ จำกัด และบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (SCG) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์วัสดุ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุนการศึกษาเพรชพระจอมเกล้ามหาบัณฑิต จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี : Petchra Pra Jom Klao Master's Degree Research Scholarship form King Mongkut's University of Technology Thonburi ที่ให้ผู้แต่งลำดับแรก

7. เอกสารอ้างอิง

[1] อรรคเดช อับดุลมาติน, ปกป้อง รัตนชู, เพ็ญพิชชา คงเพิ่มโกศล, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2563). การศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าก้นเตาที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์และถ่านหินบิทูมินัส. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.*, ปีที่ 43, ฉบับที่ 1, หน้า 49-65.

[2] สุรเชษฐ์ วรรณา, เอื้อบุญ ที่พึ่ง, จิรา ธรรมนิยม (2565). การศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุปอซโซลานต่อความทนทานในการกัดกร่อนของสารละลายกรดซัลฟูริก. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27*, เชียงราย, 24-26 สิงหาคม 2565, หน้า MAT56-1- MAT56-7.

[3] อัญชนา กิจจานนท์, ทวีชัย สำราญวานิช และ ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์ (2563). ผลกระทบของซิลิก้าฟูมต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตม, *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25*, ชลบุรี, 15-17 กรกฎาคม 2563, หน้า 1-7.

[4] เพ็ญพิชชา คงเพิ่มโกศล, อรรคเดช อับดุลมาติน, วีรชาติตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2559). การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้วัสดุประสานจากเถ้าก้นเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์. *วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย*, Vol.4, No.1, หน้า 11-19.

[5] Chanachon Sudswong (2022). *Effects of calcined clay on properties of mortar and concrete*, Construction and Building Materials, A Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (Engineering and Technology), Sirindhorn Internation Institute of Technology Thammasat University, Thailand.

[6] Meenakshi Sharma, Shashank Bishnoi, Fernando Martirena and Karen Scrivener (2021). Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review, *Cement and Concrete Research*, 149, 106564.

[7] Karen Scrivenera, Fernando Martirenab, Shashank Bishnoic and Soumen Maity (2018). Calcined clay limestone cements (LC^3), *Cement and Concrete Research*, 114, pp. 49-56.

[8] ASTM (2020). Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. ASTM C1437. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[9] ASTM (2021). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Mortars (Using 2-in or 50 mm Cube Specimens). ASTM C109/109M. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[10] Yu Chen, Yu Zhang, Branko Savija, and Oguzhan Çopuroglu (2023). Fresh properties of limestone-calcined clay-slag cement pastes, *Cement and Concrete Composites*, 138, 104962.