

# การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำแบบหล่อปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว มาใช้เป็นวัสดุทดแทนทรายในmortar

## THE PRELIMINARY INVESTIGATION OF USING WASTE PLASTER GYPSUM MOLD AS SAND REPLACEMENT MATERIAL IN MORTAR

ปิณชาน์ ตอกิตติกุล<sup>1\*</sup>, ธชนม์ ก้าวสมบูรณ์<sup>1</sup>, วัทธนา มกรโรจน์ฤทธิ์<sup>1</sup>

ศรายุทธ มาลัย<sup>1</sup> และ อภิวัดน์ ศรีภูมื่น<sup>2</sup>

Pincha Tokittikul<sup>1\*</sup>, Thachon Kaosomboon<sup>1</sup>, Watthana Makararotrit<sup>1</sup>,

Sarayut Malai<sup>1</sup>, and Apiwat Sripuman<sup>2</sup>

<sup>1</sup>คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

<sup>2</sup>สำนักงานอธิการบดี มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

<sup>1</sup>Faculty of Industrial Technology, Lampang Rajabhat University

<sup>2</sup>Office of the Rector, Lampang Rajabhat University

\*corresponding author e-mail: pincha\_t@g.lpru.ac.th

(Received: 19 April 2022; Revised: 21 May 2022; Accepted: 25 May 2022)

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้แบบหล่อปูนปลาสเตอร์ที่ใช้แล้วจากโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิกในจังหวัดลำปาง มาผลิตเป็นวัสดุผนังในงานก่อสร้าง โดยจะนำแบบหล่อปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วมาย่อยและทำการคัดขนาดให้มีการกระจายตัวของอนุภาคเป็นแบบเดียวกับทราย จากนั้นใช้เป็นส่วนผสมทดแทนทรายในmortar ปริมาณร้อยละ 10 30 50 60 80 90 และ 100 โดยปริมาตร ทำการศึกษาผลของปูนปลาสเตอร์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติการนำความร้อน จากผลการทดลองพบว่า ค่ากำลังอัด กำลังดึง และกำลังดัดของmortar มีค่าลดลง เมื่อใช้ปูนปลาสเตอร์ที่ใช้แล้วทดแทนทรายเพิ่มขึ้น โดยค่ากำลังอัดของmortar ที่ใช้ปูนปลาสเตอร์ที่ใช้แล้วทดแทนทรายในปริมาณร้อยละ 50 และ 100 โดยปริมาตร ที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 10.50 และ 7.00 เมกะปาสคาล ตามลำดับ อย่างไรก็ตามค่าการนำความร้อนของmortar ผสมปูนปลาสเตอร์ปริมาณร้อยละ 100 มีค่าเท่ากับ 0.38 วัตต์ต่อเมตร องศาเซลวิน ซึ่งลดลงถึงร้อยละ 78 เมื่อเปรียบเทียบกับmortar ควบคุม และมีความหนาแน่นประมาณ 1.60 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นการนำปูนปลาสเตอร์ที่ใช้แล้วทดแทนทราย อาจสามารถพัฒนาเป็นวัสดุผนังน้ำหนักเบาที่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนได้ในอนาคต

**คำสำคัญ:** แบบหล่อปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว ทดแทนทราย mortor กำลังอัด การนำความร้อน

## Abstract

This research aims to study the possibility of using waste plaster gypsum mold from the ceramic industry in Lampang Province to produce wall materials. Waste plaster gypsum mold was ground and sieved to keep similar particle size distribution to those of sand. The ground plaster gypsum was then replaced with sand in the mortar at 10, 30, 50, 60, 80, 90, and 100 percent by volume. The effect of waste plaster gypsum on physical, mechanical, and thermal properties was carried out. The results showed that compressive strength, tensile strength and flexural strength were decreased with the increasing amount of waste plaster gypsum. The compressive strength of mortars with the replacement of waste plaster gypsum at 50 and 100 percent by volume at 28 days was 10.50 and 7.00 Megapascal, respectively. However, the thermal conductivity of mortar containing 100 percent waste plaster gypsum was 0.38 Watts per meter per Kelvin, which was reduced by 78 percent compared to that of the control mortar. It achieved a density approximately at 1.60 gram per cubic centimeter. Therefore, waste plaster gypsum as sand replacement material might result in a lightweight wall block with suitable thermal insulation properties.

**Keywords:** Waste plaster gypsum mold, Sand replacement, Mortar, Compressive strength, Thermal conductivity

## บทนำ

อุตสาหกรรมเซรามิก เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญในการสร้างรายได้ในจังหวัดลำปาง เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต สามารถจัดหาได้ในท้องถิ่น และหนึ่งในวัสดุที่มีบทบาทต่ออุตสาหกรรมเซรามิกนอกเหนือไปจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ แบบหล่อปูนปลาสเตอร์ที่ผลิตจากแร่ยิปซัมซึ่งมีชื่อทางเคมีว่าแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) โดยแร่ยิปซัมนี้จะถูกผ่านกรรมวิธีเผาในเตาเพื่อระเหยเอาน้ำออกเหลือแต่ส่วนที่เป็นปลาสเตอร์ ซึ่งมีชื่อทางเคมีว่าแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) (มยุรี, 2552) ภายหลังจากนำมาผสมกับน้ำเพื่อขึ้นรูปเป็นแบบหล่อ จะทำปฏิกิริยากลายสภาพเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำในรูปผลึก แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) อีกครั้ง อย่างไรก็ตามแบบหล่อปูนปลาสเตอร์จะเกิดการเสื่อมสภาพภายหลังจากใช้งานในระยะเวลาหนึ่ง โดยอุตสาหกรรมประเทศไทยได้เปิดเผยข้อมูลว่าวัสดุใช้แล้วจากโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิกโดยส่วนใหญ่เป็นแบบหล่อปูนปลาสเตอร์ที่เสื่อมสภาพ โดยปีหนึ่งๆ มีปริมาณการทิ้งไม่ต่ำกว่า 38,000 ตัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551) ถือเป็นขยะ

ปริมาณมหาศาล และยังคงเป็นปัญหาด้านการจัดการ ซึ่งปัจจุบันมีการแก้ปัญหาด้วยการนำไปใช้ถมที่ อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ค่า pH ต่ำ จุลินทรีย์จะเปลี่ยนซัลเฟตในแบบหล่อปูนปลาสเตอร์ เป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulphide) หรือก๊าซไข่เน่า (Alencar, Mota, & Alencar, 2011) ซึ่งเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจและติดไฟได้

มีหลักฐานจากหลายงานวิจัยในต่างประเทศ พยายามแก้ปัญหาการจัดการขยะยิปซัมจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตปุ๋ย อุตสาหกรรมผลิตกรดฟอสฟอริก อุตสาหกรรมแร่ฟอสเฟต (Camarini et al., 2016; Cao et al., 2022; Erbs et al., 2021; Li et al., 2019; Pedreno-Rojas et al., 2020) ซึ่งยิปซัมใช้แล้วเหล่านี้ก็อยู่ในรูปผลึกแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) โดยหลายงานวิจัยทดลองนำมาผ่านกระบวนการทางความร้อนและทางเคมีต่างๆ เพื่อให้กลายเป็นรูปผลึกแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) (Chandara et al., 2009; Guan et al., 2011; Guan et al., 2012; Pereira et al., 2021) มีงานวิจัยก็ได้ศึกษาแนวทางการนำแบบหล่อปลาสเตอร์ยิปซัมใช้แล้วมาผลิตเป็นวัสดุก่อสร้าง (Sadique et al., 2012) Geraldo et al. (2018) ศึกษาการใช้ปลาสเตอร์ยิปซัมใช้แล้ว เซรามิกเหลือทิ้งชนิดที่ผลิตจากดินเหนียว เซรามิกเหลือทิ้งชนิดที่ผลิตจากดินขาว มาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง โดยนำเซรามิกเหลือทิ้งทั้ง 2 ชนิดข้างต้นมาบดให้มีอนุภาคเล็กกว่า 45 ไมโครเมตร สำหรับปลาสเตอร์ยิปซัมใช้แล้ว ก่อนนำมาผสมกับวัสดุอื่น จะนำไปตากให้แห้ง บดให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.30 มิลลิเมตร แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นขึ้นรูปก้อนทดสอบสัดส่วนผสมต่างๆ นำไปทดสอบกำลังอัด พบว่า ค่ากำลังอัดของวัสดุผสมที่ผลิตจากปลาสเตอร์ยิปซัมใช้แล้วผสมกับเซรามิกเหลือทิ้งมีค่าโดยประมาณอยู่ในช่วง 12.30-33.90 เมกะปาสคาล นอกจากนี้มีงานวิจัยศึกษาการพัฒนาวัสดุฉนวนความร้อนโดยใช้ปลาสเตอร์ยิปซัมเป็นวัสดุฐาน (Gutiérrez-González et al., 2012; Ismail, Belayachi, & Hoxha, 2020; Rivero, Báez, & Navarro, 2014) โดย Ouakarrouch et al. (2020) ได้ศึกษาสมบัติทางความร้อนของปลาสเตอร์ยิปซัมผสมกับขี้เถ้าเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุผนัง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าก้อนทดสอบที่ผลิตจากปลาสเตอร์ยิปซัมผสมขี้เถ้าในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้การนำความร้อนของวัสดุลดลงร้อยละ 36 เทียบกับก้อนทดสอบปลาสเตอร์ยิปซัมล้วน

แบบหล่อปูนปลาสเตอร์เสื่อมสภาพที่เป็นปัญหาการจัดการในอุตสาหกรรมเซรามิกจังหวัดลำปางนี้ จัดเป็นยิปซัมใช้แล้วที่อยู่ในรูปผลึกแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) เช่นเดียวกับยิปซัมใช้แล้วที่เป็นปัญหาขยะในต่างประเทศ และหลักฐานงานวิจัยในต่างประเทศที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำยิปซัมใช้แล้วมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์ อย่างไรก็ตามการศึกษาแนวทางการนำแบบหล่อปูนปลาสเตอร์เสื่อมสภาพมาใช้เป็น

วัสดุก่อสร้างยังมีไม่มากนัก อีกทั้งกระบวนการนำพลาสติกย่อยสลายมาใช้แล้วกลับมามีใหม่จะต้องผ่านกระบวนการเผาเอาน้ำออก ซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานและสร้างมลภาวะความร้อน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาแนวทางการพัฒนาแบบหล่อปูนพลาสติกที่เหลือทิ้งมาใช้เป็นวัสดุก่อผนังในงานก่อสร้าง ด้วยแนวทางการผลิตที่ไม่ซับซ้อนในรูปแบบที่ต่างออกไปจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยไม่บดละเอียด และไม่ผ่านกระบวนการเผาเอาน้ำออก เพื่อให้เป็นกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยจะแบบหล่อปูนพลาสติกมาใช้แทนทรายในมอร์ตาร์ในปริมาณต่างๆ และศึกษาผลกระทบต่อค่าการนำความร้อน ความหนาแน่น กำลังอัด กำลังดึง และกำลังค้ำ

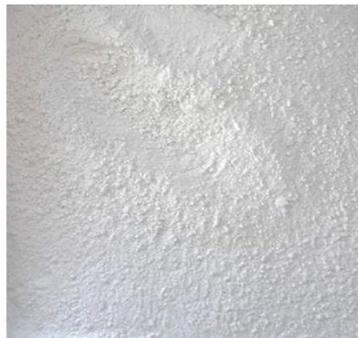
### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 1. เตรียมแบบหล่อปูนพลาสติกใช้แล้วเป็นวัสดุทดแทนทราย

สำหรับการทดลองนี้จะควบคุมให้ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคปูนพลาสติกใช้แล้วให้มีขนาดใกล้เคียงกับทรายธรรมชาติเพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนทราย โดยเริ่มจากการตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคทราย ด้วยวิธีการคัดขนาดทรายด้วยตะแกรงเบอร์ 4 8 16 30 50 และ 100 ตามลำดับ ทำการบดย่อยแบบหล่อปูนพลาสติกใช้แล้วให้มีขนาดเล็กลง ดังภาพที่ 1 แล้วนำมาคัดแยกออกเป็นขนาดต่างๆ ด้วยตะแกรงเบอร์ 4 8 16 30 50 และ 100 โดยแบบหล่อปูนพลาสติกที่เตรียมได้จากขั้นตอนนี้จะเรียกว่ามวลรวมปูนพลาสติกใช้แล้ว (Waste plaster aggregate; WPA) ตลอดจนการทดลอง จากนั้นชั่งน้ำหนักและผสม WPA เบอร์ต่างๆ เข้าด้วยกัน โดยใช้สัดส่วนใกล้เคียงกับทราย ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคทราย และ WPA ดังภาพที่ 2

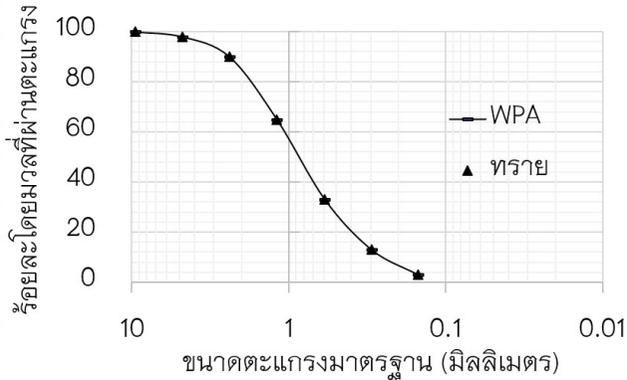


(ก)



(ข)

ภาพที่ 1 วัสดุมวลรวมที่ใช้เป็นส่วนผสมมอร์ตาร์ (ก) ทราย และ (ข) ปูนพลาสติกบด



ภาพที่ 2 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคทราย และ WPA

## 2. วิธีการผสมมอร์ตาร์

ทรายและปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 และ 2.42 ตามลำดับ โดยนำปูนปลาสเตอร์ใช้ทดแทนทรายธรรมชาติในมอร์ตาร์ปริมาณร้อยละ 10 30 50 60 80 90 และ 100 โดยปริมาตร ทั้งนี้ควบคุมให้มอร์ตาร์มีค่าการแผ่อยู่ในช่วง 190–210 มิลลิเมตร ซึ่งวัสดุต่างๆ ดังตารางที่ 1 ชั้นตอนแรก ผสมทรายและ WPA ให้เข้ากันเตรียมไว้ก่อน ชั้นตอนถัดไป เทน้ำลงในหม้อผสมแล้วเทปูนซีเมนต์ลงไป เปิดเครื่องผสม เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นเททรายและ WPA ตามลงไป ผสมต่อไปจนส่วนผสมมอร์ตาร์ทั้งหมดเข้ากันโดยใช้เวลาประมาณ 3 นาที

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้แบบห่อปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วแทนทรายในปริมาณต่างๆ

| สัญลักษณ์ | ปลาสเตอร์ใช้แล้ว<br>แทนทราย (ร้อยละ) | ปูนซีเมนต์<br>(กก/ม <sup>3</sup> ) | ทราย<br>(กก/ม <sup>3</sup> ) | ปลาสเตอร์ใช้<br>แล้ว (กก/ม <sup>3</sup> ) | น้ำ<br>(กก/ม <sup>3</sup> ) |
|-----------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|---|-----------------------------|
| 0WPA      | 0                                    | 700                                | 1531                         | 0   | 345                         |
| 10WPA     | 10                                   | 700                                | 1378                         | 140                                       | 410                         |
| 30WPA     | 30                                   | 700                                | 1072                         | 419                                       | 507                         |
| 50WPA     | 50                                   | 700                                | 766                          | 699                                       | 605                         |
| 60WPA     | 60                                   | 700                                | 612                          | 839                                       | 652                         |
| 80WPA     | 80                                   | 700                                | 306                          | 1119                                      | 745                         |
| 90WPA     | 90                                   | 700                                | 153                          | 1258                                      | 792                         |
| 100WPA    | 100                                  | 700                                | 0                            | 1398                                      | 839                         |

### 3. ทดสอบความหนาแน่น

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C642-21 ทำการแบ่งกรอกส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ผสมตามขั้นตอนในหัวข้อ 2 ลงในแบบหล่อของเหลี่ยม ขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็น 2 ชั้น ใช้แท่งกระทุ้งมอร์ตาร์ดัดไล้ฟองอากาศออกจากส่วนผสมมอร์ตาร์ในแต่ละชั้นแล้วปาดหน้ามอร์ตาร์ให้เรียบ คลุมด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกใส เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำระเหยออกจากส่วนผสมมอร์ตาร์ ปล่อยให้มอร์ตาร์แข็งตัวในแบบหล่อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นแกะก้อนมอร์ตาร์ที่แข็งแล้วออกจากแบบหล่อ นำไปบ่มในน้ำและทดสอบความหนาแน่นที่อายุ 28 วัน

### 4. ทดสอบกำลังอัด

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-20 ทำการแบ่งกรอกส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ผสมตามขั้นตอนในหัวข้อ 2 ลงในแบบหล่อของเหลี่ยม ขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็น 2 ชั้น ใช้แท่งกระทุ้งมอร์ตาร์ดัดไล้ฟองอากาศออกจากส่วนผสมมอร์ตาร์ในแต่ละชั้นแล้วปาดหน้ามอร์ตาร์ให้เรียบ คลุมด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกใส เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำระเหยออกจากส่วนผสมมอร์ตาร์ ปล่อยให้มอร์ตาร์แข็งตัวในแบบหล่อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นแกะก้อนมอร์ตาร์ที่แข็งแล้วออกจากแบบหล่อ นำไปบ่มในน้ำ และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

### 5. ทดสอบกำลังดึง

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C307-13 ทำการแบ่งกรอกส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ผสมตามขั้นตอนในหัวข้อ 2 ลงในแบบหล่อของเหลี่ยมมาตรฐานเป็น 2 ชั้น ใช้แท่งกระทุ้งมอร์ตาร์ดัดไล้ฟองอากาศออกจากส่วนผสมมอร์ตาร์ในแต่ละชั้นแล้วปาดหน้ามอร์ตาร์ให้เรียบ คลุมด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกใส เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำระเหยออกจากส่วนผสมมอร์ตาร์ ปล่อยให้มอร์ตาร์แข็งตัวในแบบหล่อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นแกะก้อนมอร์ตาร์ที่แข็งแล้วออกจากแบบหล่อ นำไปบ่มในน้ำและทดสอบกำลังดึงที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

### 6. ทดสอบกำลังดัด

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C348-14 ทำการแบ่งกรอกส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ผสมตามขั้นตอนในหัวข้อ 2 ลงในแบบหล่อของเหลี่ยม ขนาด 5x5x20 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็น 2 ชั้น ใช้แท่งกระทุ้งมอร์ตาร์ดัดไล้ฟองอากาศออกจากส่วนผสมมอร์ตาร์ในแต่ละชั้นแล้วปาดหน้ามอร์ตาร์ให้เรียบ คลุมด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกใส เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำระเหยออกจากส่วนผสมมอร์ตาร์ ปล่อยให้มอร์ตาร์แข็งตัวในแบบหล่อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นแกะก้อนมอร์ตาร์ที่แข็งแล้วออกจากแบบหล่อ นำไปบ่มในน้ำและทดสอบกำลังดัดที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

### 7. ทดสอบค่าการนำความร้อน

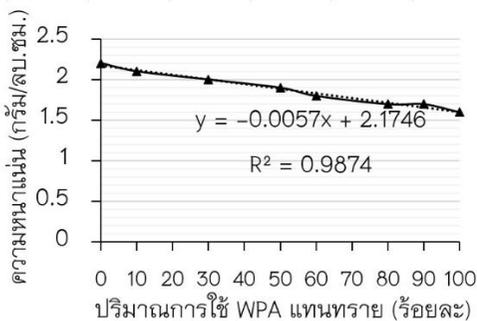
ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5334-08 ทำการแบ่งกรอกส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ผสมตามขั้นตอนในหัวข้อ 2 ลงในแบบหล่อพีวีซีทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.50 เซนติเมตร

สูง 12 เซนติเมตร เป็น 3 ชั้น ใช้แทงกระทงมอร์ตาร์ด้าไลฟองอากาศออกจากส่วนผสมมอร์ตาร์ด้าในแต่ละชั้นแล้วปิดหน้ามอร์ตาร์ด้าให้เรียบ คลุมด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกใส เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำระเหยออกจากส่วนผสมมอร์ตาร์ด้า ปล่อยให้มอร์ตาร์ด้าแข็งตัวในแบบหล่อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นแกะก้นมอร์ตาร์ด้าที่แข็งแล้วออกจากแบบหล่อ นำไปบ่มในน้ำและทดสอบค่าการนำความร้อนที่อายุ 28 วัน

## ผลการวิจัย

### 1. ผลการวิเคราะห์การใช้ WPA ทดแทนทรายในปริมาณต่างๆ ต่อค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ด้า

ผลกระทบของการใช้ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วทดแทนทรายในปริมาณต่างๆ ดังภาพที่ 3 ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ด้าที่ใช้ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วทดแทนทรายในปริมาณร้อยละ 0 10 30 50 60 80 90 และ 100 ที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 2.20 2.10 2.00 1.90 1.80 1.70 1.70 และ 1.60 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ หากเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ด้าที่ใช้ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วทดแทนทรายในปริมาณต่างๆ คิดเป็นร้อยละ จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ด้าจะลดลงตามปริมาณการใช้ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วทดแทนทราย โดยมีค่า  $R^2=0.9874$  หากใช้ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วทดแทนทรายในปริมาณร้อยละ 50 (50WPA) และ 100 (100WPA) มีความหนาแน่นลดลงร้อยละ 13.60 และ 27.30 ตามลำดับ



(ก)



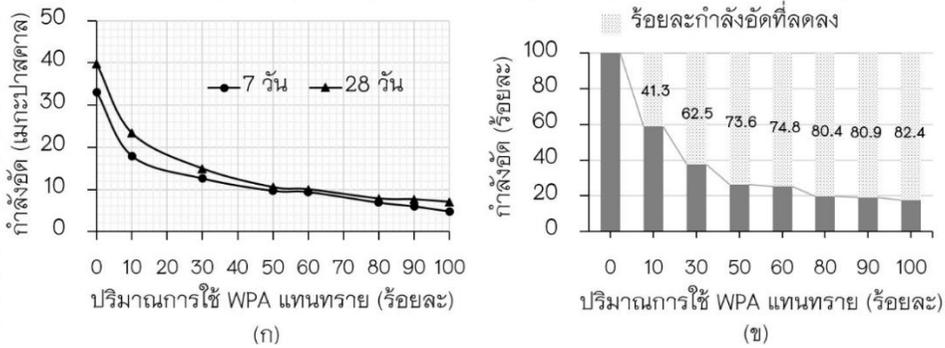
(ข)

ภาพที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ด้า และ (ข) ร้อยละความหนาแน่นที่ลดลงกับร้อยละปริมาณการใช้ WPA ทดแทนทราย

### 2. ผลการวิเคราะห์การใช้ WPA ทดแทนปูนซีเมนต์ต่อค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ด้า

ผลกระทบของการใช้ WPA ทดแทนปูนซีเมนต์ต่อค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ด้าที่ใช้ WPA ทดแทนทรายในปริมาณต่างๆ ดังภาพที่ 4 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ด้าที่ใช้ WPA ทดแทนทรายใน

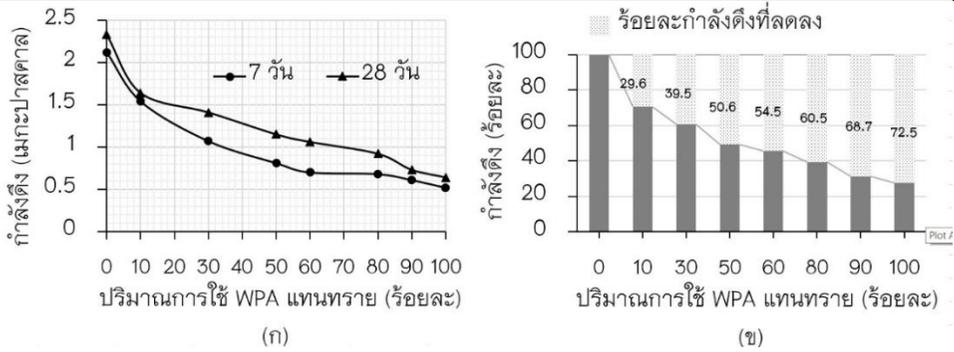
ปริมาณร้อยละ 0 10 30 50 60 80 90 และ 100 ที่อายุ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 33.00 17.90 12.60 9.70 9.40 6.90 6.00 และ 4.80 เมกะปาสคาล ตามลำดับ สำหรับค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว ทดแทนทรายในปริมาณร้อยละ 0 10 30 50 60 80 90 และ 100 ที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 39.70 23.30 14.90 10.50 10.00 7.80 7.60 และ 7.00 เมกะปาสคาล ตามลำดับ



ภาพที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) กำลังอัดของมอร์ตาร์ และ (ข) ร้อยละกำลังอัดที่ลดลงกับร้อยละปริมาณการใช้ WPA ทดแทนทราย

### 3. ผลการวิเคราะห์การใช้ WPA ทดแทนทรายในปริมาณต่างๆ ต่อค่ากำลังดึงของมอร์ตาร์

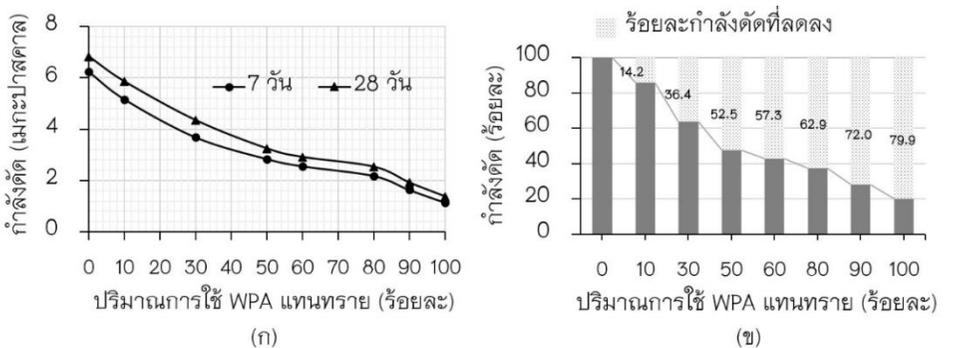
ผลกระทบของการใช้ WPA ทดแทนปูนซีเมนต์ต่อค่ากำลังดึงของมอร์ตาร์ที่ใช้ WPA ทดแทนทรายในปริมาณต่างๆ ดังภาพที่ 5 ค่ากำลังดึงของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว ทดแทนทรายในปริมาณร้อยละ 0 10 30 50 60 80 90 และ 100 ที่อายุ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 2.12 1.54 1.07 0.81 0.70 0.68 0.61 และ 0.52 เมกะปาสคาล ตามลำดับ สำหรับค่ากำลังดึงของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว ทดแทนทรายในปริมาณร้อยละ 0 10 30 50 60 80 90 และ 100 ที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 2.33 1.64 1.41 1.15 1.06 0.92 0.73 และ 0.64 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลการทดลองของกำลังดึงสัมพันธ์กับค่ากำลังอัด โดยค่ากำลังดึงของมอร์ตาร์ลดลงตามปริมาณ WPA ที่ใช้เพิ่มขึ้น ซึ่งกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่ใช้ WPA ทดแทนทรายในปริมาณร้อยละ 50 60 80 90 และ 100 มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยหากใช้ WPA ทดแทนทรายในปริมาณร้อยละ 50 จะส่งผลให้ค่ากำลังดึงของมอร์ตาร์ อายุ 28 วัน ที่ใช้ WPA ทดแทนทรายลดลงประมาณร้อยละ 51 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม (OWPA)



ภาพที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) กำลังดึงของมอร์ตาร์ และ (ข) ร้อยละกำลังดึงที่ลดลงกับร้อยละปริมาณการใช้ WPA ทดแทนทราย

#### 4. ผลการวิเคราะห์การใช้ WPA ทดแทนทรายในปริมาณต่างๆ ต่อค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์

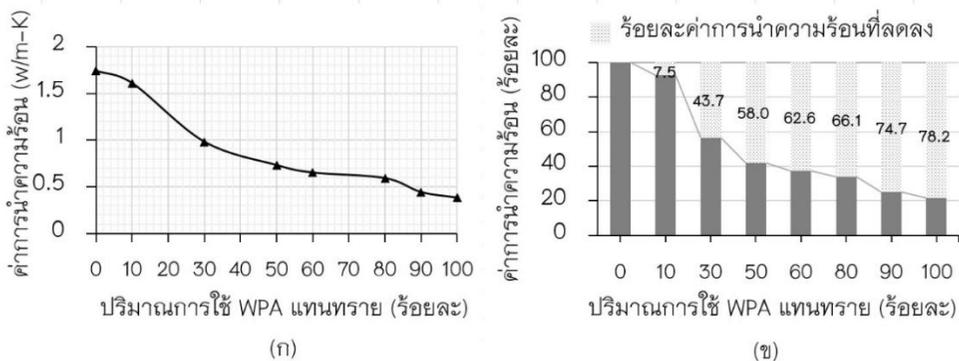
ผลกระทบของการใช้ WPA ทดแทนปูนซีเมนต์ต่อค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ WPA ทดแทนทรายในปริมาณต่างๆ ดังภาพที่ 6 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วทดแทนทรายในปริมาณร้อยละ 0 10 30 50 60 80 90 และ 100 ที่อายุ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 6.20 5.10 3.60 2.80 2.50 2.10 1.60 และ 1.10 เมกะปาสคาล ตามลำดับ สำหรับค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วทดแทนทรายในปริมาณร้อยละ 0 10 30 50 60 80 90 และ 100 ที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 6.80 5.80 4.30 3.20 2.90 2.50 1.90 และ 1.30 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลการทดลองของกำลังอัดสัมพันธ์กับค่ากำลังอัดและกำลังดึงเช่นเดียวกัน โดยค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงตามปริมาณ WPA ที่ใช้เพิ่มขึ้น โดยหากใช้ WPA ทดแทนทรายในปริมาณร้อยละ 50 จะส่งผลให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ อายุ 28 วัน ที่ใช้ WPA ทดแทนทรายลดลงประมาณร้อยละ 52 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม (OWPA)



ภาพที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) กำลังอัดของมอร์ตาร์ และ (ข) ร้อยละกำลังอัดที่ลดลงกับร้อยละปริมาณการใช้ WPA ทดแทนทราย

## 5. ผลการวิเคราะห์การใช้ WPA ทดแทนทรายในปริมาณต่างๆ ต่อค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์

ผลกระทบของการใช้ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วทดแทนทรายในปริมาณต่างๆ ดังภาพที่ 7 ค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วทดแทนทรายในปริมาณร้อยละ 0 10 30 50 60 80 90 และ 100 ที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 1.74 1.61 0.98 0.73 0.65 0.59 0.44 และ 0.38 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ตามลำดับ สำหรับค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วทดแทนทรายในปริมาณต่างๆ คิดเป็นร้อยละเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม แสดงให้เห็นว่าค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่ผสมปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วร้อยละ 50 (50WPA) และ 100 (100WPA) มีค่าการนำความร้อนลดลงถึงร้อยละ 58 และ 78 ตามลำดับ



ภาพที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ และ (ข) ร้อยละค่าการนำความร้อนที่ลดลงกับร้อยละปริมาณการใช้ WPA ทดแทนทราย

### อภิปรายผล

ผลกระทบของการใช้ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วทดแทนทรายในปริมาณร้อยละ 0 10 30 50 60 80 90 และ 100 ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากค่าความถ่วงจำเพาะของปลาสเตอร์ยิปซัมน้อยกว่าทรายธรรมชาติ (Kangavar et.al., 2022; Torkittikul et.al., 2015) ซึ่งความหนาแน่นของปลาสเตอร์ยิปซัมที่น้อยกว่าทรายธรรมชาตินี้ยังส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์เช่นกัน โดยกำลังอัด กำลังดึง และกำลังดัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลงตามปริมาณ WPA ที่ใช้เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากสาเหตุหลัก 2 ประการ ได้แก่ สาเหตุแรก มาจากการแทนที่ทรายด้วยวัสดุที่แกร่งน้อยกว่า (WPA มีความแกร่งน้อยกว่าทรายธรรมชาติ) สาเหตุประการที่สอง เกิดจากปริมาณน้ำส่วนเกินที่เติมลงไปเพื่อควบคุมค่าการไหลให้เท่ากัน (210 มิลลิเมตร) ได้เกิดการแทรกตัวออกมาระหว่างกระบวนการผสม ส่งผลให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมมอร์ตาร์โดยรวมเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อมอร์ตาร์แข็งตัว น้ำส่วนเกิน

สำหรับทำปฏิกิริยาไฮเดรชันดังกล่าวนี้จะระเหยออกไป กลายเป็นช่องว่างและรูพรุนภายในมอร์ตาร์ เมื่อทดสอบกำลังอัด ส่งผลให้มอร์ตาร์ที่ผสม WPA และเติมน้ำลงในผสมเพิ่มนี้ รับกำลังอัดได้ลดลงเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม (OWPA) (Waseem et.al., 2021)

แม้ว่าการใช้ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วทดแทนทรายในปริมาณร้อยละ 100 จะส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 7.00 เมกะปาสคาล (70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยประมาณ) ซึ่งมาตรฐานวัสดุคอนกรีตประเภทคอนกรีตบล็อก กำหนดให้มอร์ตาร์มีค่ากำลังอัดไม่น้อยกว่า 2.00 เมกะปาสคาล (20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยประมาณ) ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า มอร์ตาร์ที่ผสมปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วทดแทนทรายในปริมาณร้อยละ 100 ก็ยังมีกำลังอัดผ่านค่ากำหนด ยิ่งไปกว่านั้น สิ่งที่น่าสนใจที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ คือ การใช้ปูนปลาสเตอร์แทนทรายในมอร์ตาร์ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลงอย่างมาก และค่าการนำความร้อนจะลดลงตามการเพิ่มปริมาณปูนปลาสเตอร์ โดยมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วทดแทนทรายในปริมาณร้อยละ 50 และ 100 มีค่าการนำความร้อนลดลงถึงร้อยละ 58 และ 78 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่าเป็นผลสืบเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าทราย ผลการวิจัยที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของผู้วิจัยก่อนหน้านี้ ที่ศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าหนักทดแทนทรายต่อค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ พบว่า ค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ลดลงตามการใช้เถ้าหนักแทนที่ทรายธรรมชาติ ซึ่งเป็นผลจากความหนาแน่นของเถ้าหนักน้อยกว่าทรายเช่นกัน Ismail, Belayachi, & Hoxha, (2020) รายงานว่า การใช้ฟางข้าวเป็นผสมในวัสดุยิปซัมส่งผลให้ค่าการนำความร้อนมีค่าลดลง โดยเมื่อใช้ฟางข้าวเป็นส่วนผสมในก้อนทดสอบยิปซัมในปริมาณร้อยละ 10 และ 20 จะส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของก้อนทดสอบเท่ากับ 0.06 และ 0.06 วัตต์ต่อเมตร-เซลเซียส อย่างไรก็ตามค่ากำลังอัดมีค่าน้อยมาก ไม่ถึง 2.00 เมกะปาสคาล

### สรุปผลการวิจัย

การนำปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วจากโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิกมาใช้แทนทราย ส่งผลให้สมบัติกำลังอัด สมบัติกำลังดึง สมบัติกำลังดัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความแกร่งของปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วมีความแกร่งน้อยกว่าทรายธรรมชาติ อย่างไรก็ตามมาตรฐานวัสดุคอนกรีตประเภทคอนกรีตบล็อกกำหนดให้มอร์ตาร์มีความกำลังอัดไม่น้อยกว่า 2 เมกะปาสคาล ซึ่งมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วทดแทนทรายในปริมาณร้อยละ 100 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 7.00 เมกะปาสคาล ยิ่งไปกว่านั้นการนำปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วทดแทนทรายให้ผลดีในด้านความเป็นฉนวนความร้อนและน้ำหนักเบาของวัสดุที่อาจจะพัฒนาต่อขยายได้ในอนาคต โดยพบว่าค่าความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ลดลงตามการเพิ่มปริมาณการใช้ปูนปลาสเตอร์แทนทราย โดยความหนาแน่นของมอร์ตาร์ผสมปูนปลาสเตอร์ปริมาณร้อยละ 50 และ 100 มีค่าลดลงร้อยละ

13 และ 25 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม สำหรับค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ผสมปูนปลาสเตอร์ปริมาณร้อยละ 50 และ 100 มีค่าลดลงถึงร้อยละ 58 และ 78 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณีและสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่สนับสนุนทุนการทำวิจัย และขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา ศูนย์ทดสอบวัสดุก่อสร้าง สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ที่อำนวยความสะดวกและเอื้อเพื่อห้องปฏิบัติการต่างๆ

### เอกสารอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2551). **ข้อมูลวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิก**. กรุงเทพฯ: สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม.
- มยุรี ปาลวงศ์. (2552). **ประโยชน์ของยิปซัม**. กรุงเทพฯ: หจก. ไอเดีย สแควร์.
- Alencar, L.H., Mota, C.M., & Alencar, M.H. (2011). The problem of disposing of plaster waste from building sites: Problem structuring based on value focus thinking methodology. **Waste Management**, **31**, 2512–2521.
- Camarini, G., Pinto, M.C.C., Moura, A.G.M., & Manzo, N.R. (2016). Effect of citric acid on properties of recycled gypsum plaster to building components. **Construction and Building Materials**, **124**, 383–390.
- Cao, W., Yi, W., Peng, J., Li, J., & Yin, S. (2022). Recycling of phosphogypsum to prepare gypsum plaster: Effect of calcination temperature. **Journal of Building Engineering**, **45**, 103511.
- Chandara, C., Azizli, K.A.M., Ahmad, Z.A., & Sakai, E. (2009). Use of waste gypsum to replace natural gypsum as set retarders in Portland cement. **Waste Management**, **29**, 1675–1679.
- Erbs, A., Nagalli, A., Carvalho, K.Q., Mazer, W., Erbs, M.M., Paz, D.H.F., & Lafayette, K.P.V. (2021). Development of plasterboard sheets exclusively from waste. **Journal of Building Engineering**, **44**, 102524.
- Geraldo, R.H., Souza, J.D., Campos, S.C., Fernandes, L.F.R., & Camarini, G. (2018) Pressured recycled gypsum plaster and wastes: Characteristics of eco-friendly building components. **Construction and Building Materials**, **191**, 136–144.
- Guan, B., Kong, B., Fu, H., Yu, J., Jiang, G., & Yang, L. (2012). Pilot scale preparation of  $\alpha$ -calcium sulfate hemihydrate from FGD gypsum in Ca–K–Mg aqueous solution under atmospheric pressure. **Fuel**, **98**, 48–54.
- Guan, B., Yang, L., Fu, H., Kong, B., Li, T., & Yang, L. (2011).  $\alpha$ -calcium sulfate hemihydrate preparation from FGD gypsum in recycling mixed salt solutions. **Chemical Engineering Journal**, **174**, 296–303.

- Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Blanco-Varela, M.T., & Calderón, V. (2012). Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. **Construction and Building Materials**, **34**, 179–185.
- Ismail, B., Belayachi, N., & Hoxha, D. (2020). Optimizing performance of insulation materials based on wheat straw, lime and gypsum plaster composites using natural additives. **Construction and Building Materials**, **254**, 118959.
- Kangavar, M.E., Lokuge, W., Manalo, A., Karunasena, W., & Frigione, M. (2022). Investigation on the properties of concrete with recycled polyethylene terephthalate (PET) granules as fine aggregate replacement. **Case Studies in Construction Materials**, **16**, e00934.
- Li, Z., Xu, K., Peng, J., Wang, J., Ma, X., & Niu, J. (2019). Study on hydration and mechanical property of quicklime blended recycled plaster materials. **Construction and Building Materials**, **202**, 440–448.
- Ouakarroucha, M., Azharya, K.E., Laaroussi, N., Garoum, M., & Kifani-Sahban, F. (2020). Thermal performances and environmental analysis of a new composite building material based on gypsum plaster and chicken feathers waste. **Thermal Science and Engineering Progress**, **19**, 100642.
- Pedreno-Rojas, M.A., De Brito, J., Flores-Colen, I., Pereira, M.F.C., & Rubio-de-Hita, P. (2020). Influence of gypsum wastes on the workability of plasters: Heating process and microstructural analysis. **Journal of Building Engineering**, **29**, 101143.
- Pereira, V.M., Geraldo, R.H., Cruz, T.A.M., & Camarini, G. (2021). Valorization of industrial by-product: Phosphogypsum recycling as green binding material. **Cleaner Engineering and Technology**, **5**, 100310.
- Rivero, A.J., Báez, A.G., & Navarro, J.G. (2014). New composite gypsum plaster – ground waste rubber coming from pipe foam insulation. **Construction and Building Materials**, **55**, 146–152.
- Sadique, M., Nageim, H.A., Atherton, W., Seton, L., & Dempster, N. (2012). A new composite cementitious material for construction. **Construction and Building Materials**, **35**, 846–855.
- Torkittikul, P., Nochaiya, T., Wongkeo, W., & Chaipanich, A. (2015). Utilization of coal bottom ash to improve thermal insulation of construction material. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, Doi: 10.1007/s10163-015-0419-2.
- Waseem, S.A., Thakur, N., Islam, S., Kumar, M., & Saini, J.S. (2021). Cupola slag as partial replacement of fine aggregate in concrete – An experimental study. **Journal of Building Engineering**, **44**, 103343.