

อิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อสมบัติการหายใจผ่านของปูนหมัก ในการบูรณะโบราณสถาน

The Influence of Portland Cement on the Breathability Property of Lime Putty for Historical Structure Restoration.

ปรกรณ์ วรรณโกวิท¹ บารเมศ วรรณนะภูติ² และ ปารเมศ กำแพงฤทธิ์วงศ์³

¹ สาขาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³ สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-Mail: pakorn40@live.com., fengbmv@ku.ac.th, archpmk@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาสมบัติของปูนหมักที่ใช้ในการฉาบผิวโบราณสถานที่เหมาะสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือซีเมนต์ขาว ในปริมาณต่างๆ โดยพิจารณาสมบัติการหายใจผ่าน การดูดซึมน้ำ กำลังรับแรงอัด และดัชนีทางวิศวกรรม ได้แก่ ความหนาแน่น ระยะเวลาการก่อตัว รวมทั้งอนุภาคของปูนเหนียวในระยะเวลาหมักต่างๆ ปูนหมักที่ทดสอบได้จากการผสมปูนเหนียว ต่อ หทราย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จำนวน 4 สูตร ได้แก่ 2:5:0, 2:5:1, 2:5:2 และ 2:5:3 โดยปริมาตร ผลของการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่า เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น การหายใจผ่านของปูนหมักลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์กลไกอัตราการดูดซึมน้ำของผนังก่ออิฐ และอัตราการซึมผ่านของผิวปูนฉาบ พบว่าการหายใจผ่านของปูนฉาบ มีอิทธิพลต่อการระบายความชื้นของผนังอิฐน้อยมาก นอกจากนี้ เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวลดลง และกำลังรับแรงอัดของวัสดุเพิ่มสูงขึ้นด้วย

คำสำคัญ : 

การหายใจของปูนหมัก ปูนหมัก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การบูรณะโบราณสถาน

Abstract

The objective of this research is to determine the influence of Portland cement on the breathability of lime putty used for historical building restoration. Lime putty was tested in laboratory to determine breathability property, water absorption, compressive strength and engineering index, including density, setting time, and particle size. The study considers 4 formulas of lime putty with ratio of slake lime: sand: Portland cement of 2:5:0, 2:5:1, 2:5:2 and 2:5:3 by volume. The laboratory test results reveal that an increase in Portland cement content reduces the breathability of lime putty. However, the analysis of water adsorption and permeability of brick wall and lime

putty pasting shows that the breathability of lime putty pasting has minimal effect on the water content in the brick wall. In addition, an increase of Portland cement content significantly reduces the settling time and increase in the compressive strength of the material.



Keywords:

breathability of lime putty, lime putty, Portland cement, historical structure restoration

1. บทนำ

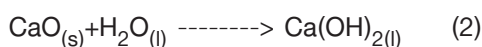
ปูนหมักเป็นวัสดุก่อสร้างที่ถูกเรียกชื่อตามวิธีการทำงานของช่างสมัยโบราณที่ได้จากการเอาหินปูนเผาสุกมาหมักในน้ำ แล้วเปลี่ยนสถานะเป็นปูนเหนียว (cement paste) หรือ putty สำหรับใช้ในงานปั้นงานฉาบผิว และงานก่ออิฐ ปัจจุบันยังคงมีการใช้ปูนหมักเพื่อการบูรณะโบราณสถาน โดยคำนึงถึงคุณค่าทางประวัติศาสตร์ อย่างไรก็ตามการใช้งานปูนหมักในปัจจุบันมีข้อจำกัด ได้แก่ ความยุ่งยากในขั้นตอนการเตรียมวัสดุ กระบวนการหมัก และเทคนิคการใส่สารผสมเพิ่มก่อนนำไปใช้งาน เช่น การผสมน้ำอ้อย น้ำเชื่อม กาวหนังสัตว์ เพื่อเร่งการก่อตัวและเพิ่มความเหนียว เป็นต้น

ปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของปูนหมักโดยการผสมซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือภาษาช่างโบราณเรียกสั้นๆ ว่า ปูนขาว เพื่อมาทดแทนสารผสมเพิ่มสูตรโบราณ ให้มีสมบัติเร่งการก่อตัว และสะดวกต่อการใช้งาน อย่างไรก็ตามปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีสมบัติการหายใจผ่านด้อยกว่าปูนหมักตามสูตรโบราณ และอาจเป็นสาเหตุให้การระบายความชื้นของผนังอิฐ ที่ดูดซึมน้ำ (capillary action) จากฐานรากลดลง และทำให้เกิดความเสียหายต่อผิวผนังปูนฉาบและฉัตรกรรม ในการวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของปูนหมัก ซึ่งประกอบด้วย ปูนเหนียว 2 ส่วน ต่อ ททราย 5 ส่วน

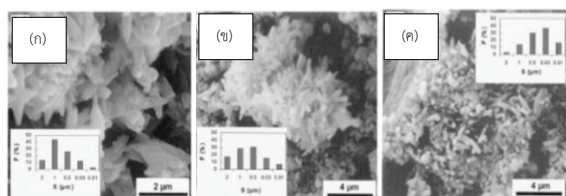
(ซึ่งเป็นสูตรที่ใช้ในการบูรณะวัดอรุณราชวราราม) และเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่แตกต่างกันรวมทั้งสิ้น 4 สูตร โดยทดสอบสมบัติการหายใจผ่าน (breathability test) การดูดซึมน้ำ (water absorption) กำลังรับแรงอัดในทิศทางเดียว (uniaxial compression test) และดัชนีทางวิศวกรรม ได้แก่ ความหนาแน่น (density test) ระยะเวลาการก่อตัว (setting time) รวมทั้งการวิเคราะห์หอนุภาคของปูนเหนียว (hydrometer test) ในระยะเวลาหมักต่างๆ

2. กระบวนการผลิตปูนหมัก และปฏิกิริยาเคมี

ปูนหมัก หรือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ เป็นวัสดุที่ได้จากการนำหินปูน หรือเปลือกหอย ซึ่งเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต $[\text{CaCO}_3]$ มาเผาด้วยอุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส เพื่อไล่คาร์บอนไดออกไซด์ตามสมการที่ (1) แล้วผสมน้ำซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวและคายความร้อนออก กลายเป็นปูนเหนียว และหมักทิ้งไว้เป็นเวลา 2 เดือนตามสมการที่ (2) ขั้นตอนการเตรียมวัสดุและปฏิกิริยาเคมีของปูนหมักมีดังนี้ [1], [2]



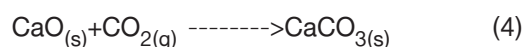
ระยะเวลาในการหมักจะทำให้ผลึกของปูนขาว ซึ่งมีรูปทรงหกเหลี่ยมมีขนาดเล็กลง ซึ่งมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา และการใช้งานตามภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ผลึกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ก) เมื่อเริ่มหมัก (ข) อายุ 1 ปี และ (ค) อายุ 14 ปี โดยกล้อง SEM [3]

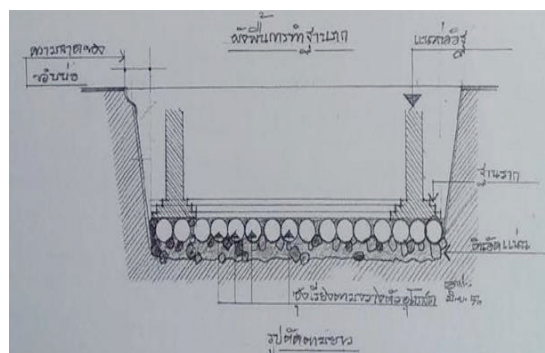
เมื่อหมักปูนได้ตามระยะเวลาแล้ว จะนำปูนที่เตรียมไว้ไปใช้ในการฉาบ โดยมีการผสมสารผสมเพิ่ม (admixture) ได้แก่ น้ำตาลทรายแดง หรือหัวน้ำอ้อย หรือกาบแห้งสับ เพื่อให้อายุมีความเหนียว และเร่งการก่อตัว

เมื่อปูนหมักถูกนำมาใช้งาน น้ำที่เป็นส่วนประกอบจะระเหยออกตามสมการที่ (3) และเกิดการแข็งตัวกลายเป็นแคลเซียมออกไซด์สมการที่ (4) และเมื่อระยะเวลาผ่านไปแคลเซียมออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ และกลายเป็นหินปูนอีกครั้ง

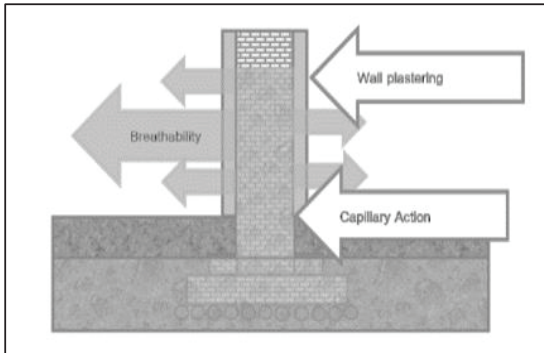


3. กลไกการดูดซึม การหายใจผ่าน ที่ทำให้เกิดความเสียหายของผนังโครงสร้าง

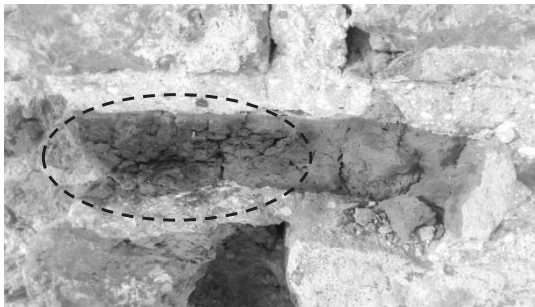
ความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อผนังโครงสร้างโบราณสถาน และจิตรกรรม เนื่องจากโครงสร้างของโบราณสถานส่วนมากนั้น ใช้อิฐมอดูเป็นวัสดุฐานรากรวมถึงกำแพงและผนังรับแรง (bearing wall) ในบางกรณี มีการใช้ไม้วางในแนวนอนรองรับผนังก่ออิฐตามภาพที่ 2 เพื่อกระจายแรงกดลงบนดิน เนื่องจากลักษณะที่ตั้งชุมชนอยู่ในที่ราบลุ่ม มีระดับน้ำใต้ดินสูง ระดับของฐานรากมักจะก่อสร้างต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งจะช่วยรักษาสภาพความสมบูรณ์ของฐานรากไม่ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อฐานรากอิฐสัมผัสกับน้ำใต้ดิน อิฐจะดูดซึมน้ำขึ้นมาบนผนัง เนื่องจากแรงตึงผิว (capillary action) ทำให้เกิดความชื้นสะสมในผนังอิฐ และความชื้นนั้นระบายออกทางผิวผนังด้านข้างโดยผ่านวัสดุปูนฉาบ ตามภาพที่ 3 ถ้าวัสดุปูนฉาบมีสมบัติการหายใจผ่านไม่ดี จะทำให้เกิดการร่อนของผนังปูนฉาบและอิฐ อิฐที่เผาไม่สุกมีโอกาสเสื่อมสภาพได้สูง (หรืออิฐเน่า) ตามภาพที่ 4 และความชื้นยังเป็นตัวกลางของปฏิกิริยา Oxidation, Hydrolysis และ Ionization ซึ่งเป็นตัวเร่งการเสื่อมสภาพได้อย่างรวดเร็ว [4]



ภาพที่ 2 ลักษณะการวางฐานรากไม้ของโครงสร้างโบราณ [5]



ภาพที่ 3 กลไกการดูดความชื้นในผนังก่ออิฐและการซึมผ่านของผนังปูนฉาบ



ภาพที่ 4 อิฐมอญที่เผาไม่สุกและเสื่อมสภาพจากการดูดซึมความชื้น (หรืออิฐเน่า)

ด้วยกลไกดังกล่าว การหายใจผ่านของวัสดุปูนหมักจึงเป็นสมบัติที่สำคัญในการควบคุมคุณภาพวัสดุสำหรับบูรณะโบราณสถาน กลไกการหายใจของปูนหมัก เกิดจากการซึมผ่านของไอน้ำ (breathability, permeability) ต่อพื้นที่หน้าตัดของผนังปูนหมัก เนื่องจากความดันไอน้ำที่แตกต่างกัน ซึ่งได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิ และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่างกัน

สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำผ่านวัสดุหนึ่งๆ สามารถวิเคราะห์ได้จากการทดสอบการหายใจผ่านของวัสดุในห้องปฏิบัติการ [6] โดยที่ค่าอัตราการระเหยผ่าน (Water Vapor Transmission, WVT) คำนวณได้จากสมการที่ 5

$$WVT = G/A = (G/t) / A \quad (5)$$

เมื่อ

WVT = อัตราการระเหยผ่าน ($g / hr.m^2$)

G = น้ำหนักที่เปลี่ยนไป (g)

T = เวลาที่ใช้ (hr)

G / t = อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (g / hr)

A = พื้นที่หน้าตัด (m^2)

เนื่องจากค่า WVT ขึ้นกับความดันที่แตกต่างกันทั้งสองด้านของวัสดุ ดังนั้นสมบัติการหายใจของวัสดุ จึงพิจารณาจากค่า Permeance ดังสมการที่ (6)

$$Permeance = WVT/\Delta p = WVT/S (R1-R2) \quad (6)$$

เมื่อ

Permeance = อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ
($g / Pa.s.m^2$)

Δp = ความแตกต่างระหว่างความดันไอ
(mmHg)

S = ความดันไอที่อิ่มตัวในขณะทดสอบ
(mmHg)

R1 = % ความชื้นสัมพัทธ์ของแหล่งให้กำเนิด

R2 = % ความชื้นสัมพัทธ์ในทิศทางตรงข้าม

$$1 \text{ mmHg} = 1.333 \times 10^2 \text{ Pa}$$

ค่า Permeance ของคอนกรีต 1 : 2 : 4 (ซีเมนต์ : ทราย : กรวด) และอิฐมอญมีค่าเท่ากับ 7.15×10^{-08} และ $4.58 \times 10^{-08} \text{ g/Pa.s.m}^2$ ตามลำดับ [7] ส่วนค่า Permeance ของวัสดุมอร์ตาร์สำหรับฉาบ (ส่วนผสมระหว่างซีเมนต์ 1 ส่วนกับทราย 3) มีค่าเท่ากับ $3.90 \times 10^{-08} \text{ g/Pa.s.m}^2$ [8]

ในการระเหยผ่านวัสดุ 2 ชนิดที่มีความสามารถในการหายใจต่างกัน สามารถคำนวณหาค่า Permeance รวมของวัสดุ 2 ชนิดได้จากหลักการของซึมผ่านของดาร์ซี ดังสมการที่ (7)

$$P_T = P_1 \times P_2 / (P_1 + P_2) \quad (7)$$

เมื่อ

P_T = Permeance รวมของวัสดุชนิดที่ 1 และ 2
 P_1, P_2 = Permeance ของวัสดุชนิดที่ 1 และ 2

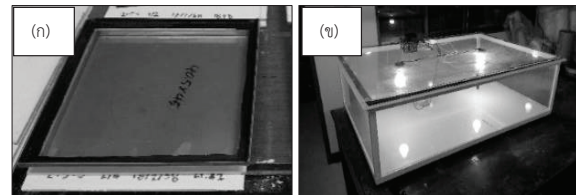
4. การทดสอบการหายใจผ่านของปูนหมัก

วัสดุปูนหมักที่ทดสอบเตรียมโดยการผสมปูนหมักกับทราย ด้วยอัตราส่วนโดยปริมาตร (ปูนหมัก: ทราย) เท่ากับ 2:5 โดยนำปูนดิบ [CaO] มาย่อยโดยการทุบเป็นก้อนเล็กๆ เพื่อลดความรุนแรงจากปฏิกิริยาใส่ลงไปในถังหมัก แล้วเติมน้ำลงไปให้ท่วมสูงกว่าปูนดิบไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว หลังจากนั้น กวนจนกว่าปฏิกิริยาจะหยุด ประมาณ 15 นาที ได้ปูนขาวเหนียว [Ca(OH)₂] จากนั้นนำปูนขาวเหนียวที่ได้ขึ้นจากบ่อล้างน้ำร้อนผ่านตะแกรงขนาด 5 x 5 มิลลิเมตร เพื่อเอาเศษวัสดุและปูนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออก และนำปูนไปหมักอีกครั้ง รักษาระดับน้ำให้ท่วมไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว เมื่อหมักปูนเป็นระยะเวลา 2 เดือนแล้ว ให้ถ่ายน้ำออก แล้วจึงนำปูนเหนียวไปผสมกับทรายและซีเมนต์ขาวจำนวน 4 สูตร แต่ละสูตรจะเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นจำนวน 0%, 14%, 29% และ 43% ตามลำดับ โดยปริมาตรของมอร์ตาร์ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์แต่ละสูตร

สูตรการผสม	ปูนหมัก	ทราย	ซีเมนต์ขาว
1	2	5	0
2	2	5	1
3	2	5	2
4	2	5	3

การทดสอบการหายใจผ่านของปูนหมักดำเนินการตามมาตรฐาน Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials, (ASTM E96-00) ด้วยวิธี Water Method โดยการเติมน้ำในภาดทดสอบปิดทับด้วยชั้นตัวอย่างความหนา 6 มิลลิเมตร ยานวโดยรอบป้องกันการรั่วซึม แล้วนำภาดทดสอบไปเก็บในตู้ที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ 32 องศาเซลเซียส และ 50% ตามลำดับ บันทึกน้ำหนักน้ำที่สูญเสียน้ำมีอัตราการสูญเสียน้ำที่ และหาค่าการหายใจหรือ Pearmeance จากสมการที่ (6)

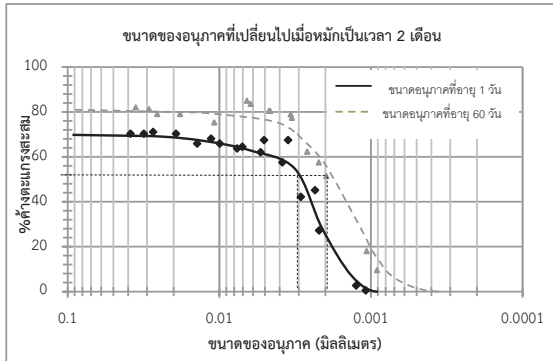


ภาพที่ 5 อุปกรณ์การทดสอบการหายใจของปูนหมัก
 (ก) ภาดทดสอบขนาดตัวอย่าง 30x30 cm และ (ข) ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ

5. ผลการศึกษา

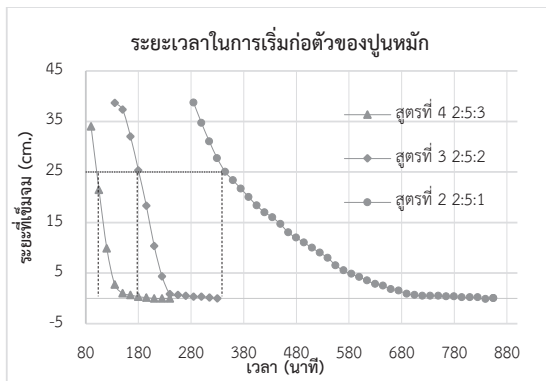
5.1 ดัชนีทางวิศวกรรมของปูนหมัก

ผลการทดสอบค่าดัชนีทางวิศวกรรมของปูนหมัก 4 สูตร ได้แก่ อนุภาควัสดุและความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น ระยะเวลาก่อตัว และการดูดซึมน้ำ พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของปูนเหนียวเท่ากับ 3.82 g/cm³ เมื่อหมักเป็นระยะเวลา 2 เดือน พบว่า ขนาดอนุภาควัสดุลดลงดังแสดงในภาพที่ 6 โดยค่าอนุภาคเฉลี่ย (Mean Grain Size, D50) ของปูนหมักที่เวลา 1 วัน และ 60 วัน มีค่า เท่ากับ 0.0029 mm และ 0.0018 mm ตามลำดับ

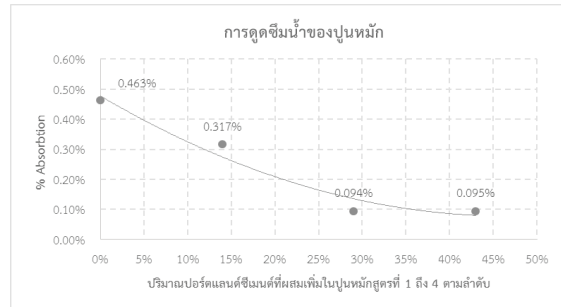


ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงอนุภาคเมื่อหมักปูนเป็นเวลา 2 เดือน

ค่าความหนาแน่นหลังอบแห้งของปูนหมักสูตรต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้นจาก สูตรที่ 1 ถึงสูตรที่ 4 โดยมีค่า 1.69 ถึง 1.88 กรัม ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น ทำให้ระยะการก่อตัวและการดูดซึมน้ำลดลง ดังแสดงในภาพที่ 7 และ 8 ตามลำดับ



ภาพที่ 7 ระยะเวลาในการเริ่มก่อตัวของของปูนหมัก สูตรที่ 2 ถึง 4

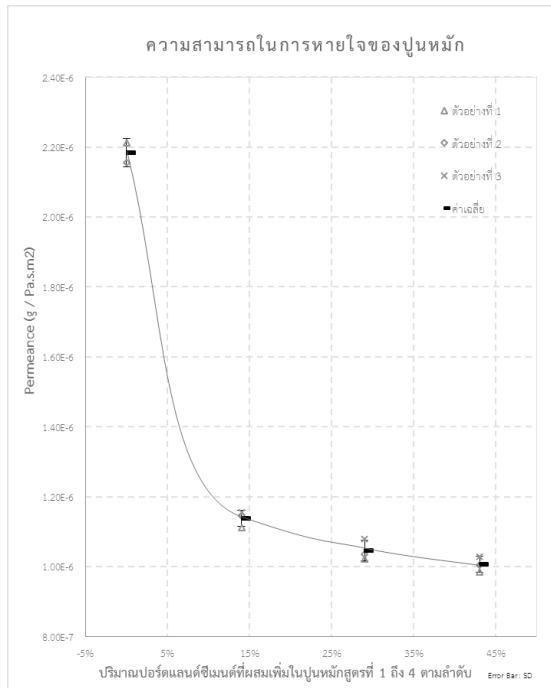


ภาพที่ 8 ความสามารถในการดูดซึมน้ำของปูนหมักตามปริมาณปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น

5.2 สมบัติการหายใจผ่านของปูนหมัก

จากการทดสอบความสามารถการหายใจของปูนหมักสามารถคำนวณหาค่าการหายใจผ่านจากสมการที่ 5 และ 6 และผลตามตารางที่ 2 และภาพที่ 9 ตารางที่ 2 สรุปการหายใจผ่านของปูนหมักแต่ละสูตร สูตรผสมปูน

สูตรผสมปูน	Permeance (g / Pa.s.m ²)
1	2.18×10^{-6}
2	1.14×10^{-6}
3	1.05×10^{-6}
4	1.01×10^{-6}



ภาพที่ 9 การหายใจผ่านของปูนหมักแต่ละสูตร

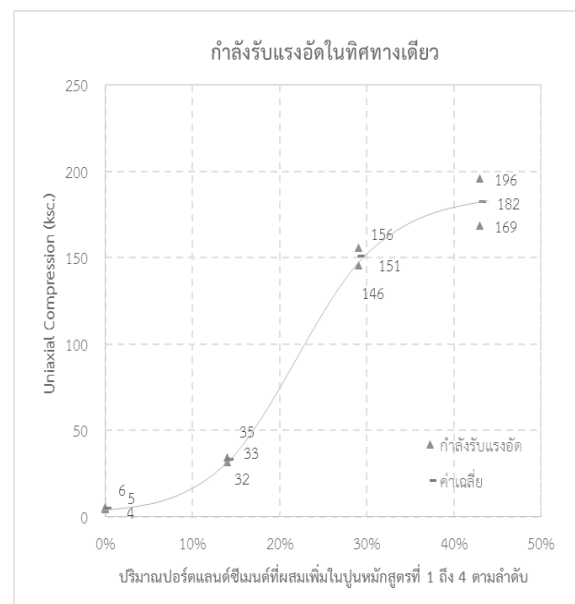
ผลจากการศึกษาพบว่า ปูนหมักที่ไม่มีส่วนผสมของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่า Permeance เท่ากับ 2.18×10^{-6} g/ Pa.s.m² และเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้นจาก 14% ถึง 43% พบว่าค่า Permeance ลดลงเป็น 1.14×10^{-6} ถึง 1.01×10^{-6} g/ Pa.s.m² ตามลำดับ และในกรณีที่ว่าวัสดุฉาบเป็นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ค่า Permeance มีค่าเพียง 3.90×10^{-8} g/ Pa.s.m² ซึ่งมีค่าน้อยกว่าปูนหมักที่ผสมซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

5.3 ค่ากำลังรับแรงอัด

จากการทดสอบ Uniaxial Compression Test ของปูนหมักตามมาตรฐาน Standard Test Method for Compressive Strength (ASTM C 109) [9] โดยมีอายุทดสอบที่ 35 วัน สามารถคำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัดได้ตามตารางที่ 3 และภาพที่ 10

ตารางที่ 3 กำลังรับแรงอัดของปูนหมักตามส่วนผสมจากสูตรที่ 1 ถึง 4

สูตรผสมปูน	กำลังรับแรงอัด (ksc)	โมดูลัสยืดหยุ่น (kg/cm ²)
1	4.94	268
2	33.29	2,076
3	150.83	7,792
4	182.32	10,112



ภาพที่ 10 ความสามารถในการรับแรงอัดของปูนหมักตามสูตรผสมต่างๆ

ผลจากการศึกษาพบว่าอัตราที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้นในปริมาณ 14% ถึง 43% นั้นสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ 33.29 ถึง 182.32 ksc ตามลำดับ

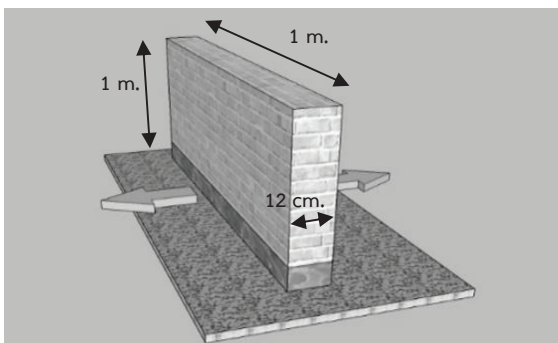
สรุปผลการทดสอบสมบัติของปูนหมัก และดัชนีทางวิศวกรรม ในอัตราส่วนผสมต่างๆ แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบสมบัติของวัสดุ

Material	Permeance (g/Pa s m ²)	Setting Time (min)	Compression (ksc)
อิฐมอญ	4.58×10^{-08}	-	71.38
คอนกรีต 1:2:4	7.15×10^{-08}	~120	∞
ปูนฉาบทั่วไป	3.90×10^{-08}	> 60	35
ปูนหมัก			
-สูตรที่ 1	2.18×10^{-6}	∞	4.94
-สูตรที่ 2	1.14×10^{-6}	345	33.29
-สูตรที่ 3	1.05×10^{-6}	180	150.83
-สูตรที่ 4	1.01×10^{-6}	100	182.32

6. ความสัมพันธ์ระหว่างการหายใจของผนังปูนหมักและการดูดซึมน้ำของอิฐ

ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำของอิฐและการหายใจของผนังปูนหมักสามารถวิเคราะห์โดยการจำลองผนังอิฐที่มีขนาด 1x1 เมตร หนา 0.12 เมตร ดังภาพที่ 11 ผนังก่ออิฐมอญจะดูดซับน้ำจากฐานรากที่แช่น้ำด้วยแรงตึงผิวที่เกิดขึ้นภายในช่องว่างของอิฐ ซึ่ง Rate of Absorption (Sorptivity) ของอิฐมอญกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $1.16 \text{ g} / \text{t}^{0.5}$ [10] ดังนั้นปริมาณน้ำที่ดูดซึมเข้าผนังก่ออิฐในระยะเวลา 1 วัน มีปริมาณ 528.96 g (หรือมีอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ $21.98 \text{ g} / \text{hr}$ หรือน้ำจะถูกดูดซับขึ้น 44 mm



ภาพที่ 11 ลักษณะการดูดซับน้ำและการหายใจของผนังก่ออิฐ

ความชื้นที่ดูดซับโดยอิฐมอญจะระเหยออกผ่านผนังปูนหมัก ปริมาณความชื้นที่สามารถระเหยออกและปริมาณความชื้นที่สะสมในผนังก่ออิฐ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) และ (6) ซึ่งมีปัจจัยขึ้นอยู่กับพื้นที่การระเหย อุณหภูมิ และความชื้น โดยพื้นที่การระเหยมีค่าเท่ากับ 0.044 m^2 เมื่อพิจารณาสภาพแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ (อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส และ ความชื้นสัมพัทธ์ 50%) และสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย (ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ 35 องศาเซลเซียส และ 60% ตามลำดับ) สามารถวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่ระเหยออกและปริมาณน้ำที่ค้างในผนังได้ตามตารางที่ 5 และภาพที่ 12 ซึ่งพบว่าผนังอิฐที่ไม่ได้ฉาบปูนนั้นสามารถระบายความชื้นได้ดี และไม่มี ความชื้นค้างสะสมในผนังอิฐสำหรับผนังอิฐฉาบด้วยปูนหมักสูตรที่ 1 ถึง 4 รวมทั้งผนังอิฐฉาบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้น เนื่องจากวัสดุมีค่า Permeance ที่ต่ำ ดังนั้นจึงมีความชื้นสะสมในผนังอิฐมอญค่อนข้างมาก

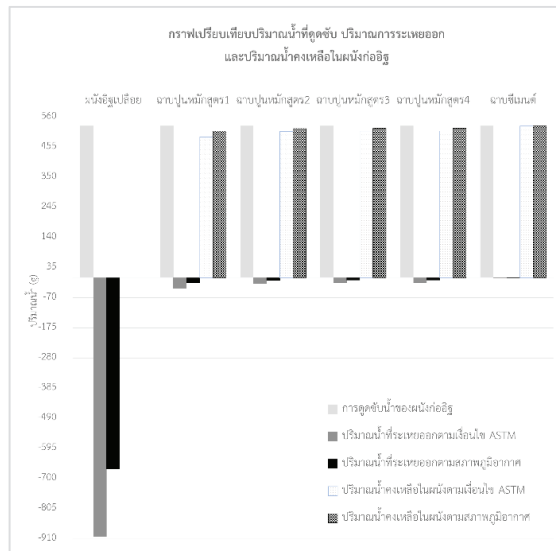
ค่า Permeance เฉลี่ย (PT) ของการหายใจผ่านวัสดุสองชนิด (Media) ได้แก่ อิฐ และปูนหมัก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) และแสดงในตารางที่ 6 และภาพที่ 13

ตารางที่ 5 ปริมาณน้ำที่เข้า-ออก และน้ำค้างอิฐมอญวัสดุฉาบผิว

วัสดุฉาบผิว	น้ำที่ระเหยออก (g)	
	ASTM E96	TH
ระเหยอิสระ	903.03	665.92
ปูนหมัก		
-สูตรที่ 1	38.37	17.90
-สูตรที่ 2	19.99	9.33
-สูตรที่ 3	18.37	8.57
-สูตรที่ 4	17.68	8.25
ปูนฉาบทั่วไป	0.68	0.32

ตารางที่ 5 (ต่อ)

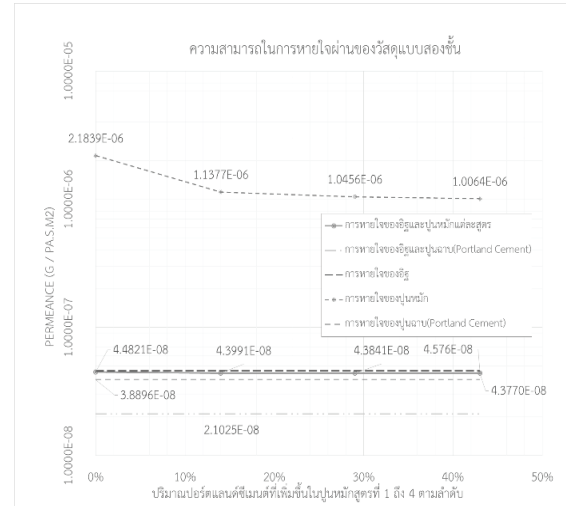
วัสดุฉาบผิว	ปริมาณน้ำที่ค้างในผนัง (g)			
	ASTM E96	%	TH	%
ระเหยอิสระ	-	0%	-	0%
ปูนหมัก				
-สูตรที่ 1	490.59	3%	511.06	97%
-สูตรที่ 2	508.97	96%	519.63	98%
-สูตรที่ 3	510.59	97%	520.39	98%
-สูตรที่ 4	511.28	97%	520.71	98%
ปูนฉาบทั่วไป	528.28	100%	528.64	100%



ภาพที่ 12 การเปรียบเทียบน้ำที่ดูดซับ และระเหยออก
จากผนังผ่านวัสดุฉาบผิวประเภทต่างๆ

ตารางที่ 6 ค่าการหายใจผ่านของอิฐที่ฉาบด้วยวัสดุฉาบ
ผิวชนิดต่างๆ และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความ
สามารถในการหายใจผ่านเมื่อเทียบกับปูนหมักสูตรที่ 1

วัสดุ	P_T (g/Pa s m ²)	%ความแตกต่าง
ปูนฉาบทั่วไป	2.1025×10^{-08}	53.09%
ปูนหมัก สูตรที่ 1	4.4821×10^{-08}	-
ปูนหมัก สูตรที่ 2	4.3991×10^{-08}	1.85%
ปูนหมัก สูตรที่ 3	4.3841×10^{-08}	2.19%
ปูนหมัก สูตรที่ 4	4.3770×10^{-08}	2.35%



ภาพที่ 13 ความสามารถในการหายใจของวัสดุฉาบผิว
ชนิดต่างๆ กับอิฐมวลฉนวน

7. สรุปผล

จากการทดสอบสมบัติปูนหมักสำหรับฉาบผิว
ที่มีส่วนผสมระหว่างปูนเหนียวกับทรายในอัตราส่วน
2 : 5 และเพิ่มปริมาณซีเมนต์ขาวซึ่งเป็นปอร์ตแลนด์ซีเมนต์
ในปริมาณที่ต่างกันจำนวน 4 ส่วนผสม เพื่อศึกษาอิทธิพล
ของปริมาณซีเมนต์ขาวต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของ
ปูนหมัก โดยเฉพาะสมบัติการหายใจของวัสดุ จะเห็น
ได้ว่าเมื่อปริมาณซีเมนต์ขาวเพิ่มขึ้น สมบัติการหายใจ
ของปูนหมักลดลง โดยปูนหมักในสูตรผสมที่ 2 ถึงสูตร
ผสมที่ 4 ที่มีปริมาณซีเมนต์ขาว 14 ถึง 43% ของ
ปูนหมัก สมบัติในการหายใจลดลงประมาณ 2 เท่า
ของปูนหมักสูตรที่ 1 ที่ไม่มีการผสมซีเมนต์ขาว กำลัง
ต้านทานแรงอัดเพิ่มขึ้น 6 ถึง 60 เท่า และระยะเวลา
การก่อตัวลดลงเป็น 100 นาที ถึง 6 ชั่วโมง

เมื่อวิเคราะห์การดูดซึมน้ำของผนังก่ออิฐ (ขนาด
ความหนา 12 เซนติเมตร กว้าง 1 เมตร และสูง 1 เมตร)
และการหายใจผ่านปูนฉาบของสูตรผสมที่ 1 ถึง สูตร
ผสมที่ 4 พบว่า ปริมาณความชื้นของน้ำที่ซึมผ่าน
ผนังปูนมีค่าเพียง 3 ถึง 6% ของน้ำที่ผนังอิฐดูดซึม

ดังนั้นการใส่ปูนซีเมนต์ขาวเพิ่มในปริมาณ 14 ถึง 43% ของปูนหมัก จึงไม่มีผลกระทบต่อการหายใจผ่านของวัสดุผนังปูนหมัก

เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ขาวที่ผสมในอัตราส่วน 14 ถึง 43% ของปูนหมัก มีผลต่อสมบัติการหายใจของปูนหมักเพียงเล็กน้อย ดังนั้นปัจจัยในการพิจารณาเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมของปูนหมัก จึงประกอบด้วยสมบัติการรับแรงอัด โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) และระยะเวลาในการเซตตัวโดยปูนหมักสูตรที่เหมาะสมได้แก่ปูนหมักสูตรที่ 2 เนื่องจากกำลังรับแรงอัด และโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่นซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 33 ksc และ $2,076 \text{ kg/cm}^2$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอิฐมอดูโดยทั่วไป

ในการวิจัยนี้ความเร็วลมที่ใช้ในการคำนวณการได้ใช้ค่าจากข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเร็วลมที่เกิดขึ้นจริง การดูดซึมน้ำของอิฐเป็นการคำนวณโดยใช้ค่าจากการทดสอบวัสดุที่มีความแตกต่างกันตามลักษณะภูมิประเทศ และมาตรฐานของการผลิต ในการทดสอบต่อไปควรที่จะดำเนินการทดสอบโดยใช้อิฐโบราณ ฉาบด้วยปูนหมักแต่ละสูตรเพื่อหาค่าที่แท้จริง พิจารณาค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่นของอิฐมอดู และควรเปรียบเทียบเพิ่มเติมกับการทดสอบด้วยมาตรฐานอื่นๆ

8. เอกสารอ้างอิง

[1] สมชาติ จิงศิริอารักษ์. 2530. ปูนดำ ปูนหมัก, ส่วนที่ 2 น.1-8. ใน การสัมมนาการอนุรักษ์โบราณสถานในฐานะเป็นหลักฐานทางวิชาการ. มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพฯ.

[2] ชมพูนุท ประศาสน์เศรษฐ. 2540. เทคนิคการเตรียมปูนและปูนปั้นแบบประเพณีของภาคเหนือและจังหวัดเพชรบุรี. เมืองโบราณ. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์เมืองโบราณ, กรุงเทพฯ.

[3] de la Torre M J.. 2000. Aging of Lime Putty : Effects on Traditional Lime Mortar Carbonation, pp. 1070-1076 Vol3 NO.5. The American Ceramic Society, ACerS published, Ohio.

[4] โชติกาญจน์ ราชกรม. 2556. การพัฒนามอร์ตาร์เพื่อใช้ปฏิสังขรณ์โบราณสถานก่ออิฐถือปูน วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

[5] สมใจ นิมเล็ก. 2556. สืบเสาะสืบสานโครงสร้างอาคารสถาปัตยกรรมไทย. ศิลปวัฒนธรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์มติชน, กรุงเทพฯ.

[6] ASTM International. 2000. ASTM E96. Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. ASTM International, United States.

[7] Carlson A.R.. 2011. Permeability of Common Building Material to Water Vapor. BUILDING IN ALASKA. University of Alaska Fairbanks. Alaska.

[8] Straube J.. 2007. Moisture Properties of Plaster and Stucco for Straw Bale Buildings. Canada Mortgage and Housing Corporation. CMHC. Canada.

[9] ASTM International. 2002. ASTM C109. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. ASTM International, United States.

[10] D. Hoff W. 2002. Capillary action, pp. 112. Water Transport in Brick, Stone and Concrete. CRC Press, Taylor & Francis, United States.