

สมบัติทางกลของอิฐโบราณ และกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อ เพื่อการอนุรักษ์โบราณสถานในเชียงใหม่

Mechanical Properties of Ancient Bricks and Compressive Strength of Substitution Masonry for Ancient Building Preservation in Chiang Sean

ชวัลวิทย์ ภารสังข์^{1*}, พิรลธิ์ มหาสุวรรณชัย², กันตณณ จินทราคำ³, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร⁴, ชัยณรงค์ อธิสกุล⁵ และ สุทัศน์ สีสาวทวิวัฒน์⁶

^{1,2,3,4,5,6} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: Chawanvit.phaa@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะหาสมบัติทางกลของอิฐโบราณจากโบราณสถานในเชียงใหม่ โดยได้ทำการทดสอบสมบัติทางกลในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และความพรุน โดยทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐในรูปแบบลูกบาศก์ และนำเสนอวิธีการทดสอบอิฐก่อทดแทนรูปแบบปริซึมแบบมีวัสดุประสานเพื่อหาค่ากำลังอัดและค่าคงที่ยืดหยุ่น โดยตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบนั้นได้รับการสนับสนุนจากกรมศิลปากร ตัวอย่างอิฐทดแทนที่ใช้ในการทดสอบผลิตขึ้นตามแนวทางของกรมศิลปากรสำหรับใช้ในงานเชิงอนุรักษ์โบราณสถานของไทย วัสดุประสานที่ใช้ในงานทดสอบจะใช้ส่วนผสมโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ขาวปูนหมัก และทรายในอัตราส่วน 1:8:24 ตามลำดับ อิฐก่อที่ใช้ในการทดสอบก่อด้วยอิฐทดแทนขนาด 15x30x5 ซม.³ ในรูปแบบปริซึมสี่เหลี่ยมผืนผ้า ก่อเต็มผ่านตามแนวราบ 6 แผ่น ในการทดสอบนั้นใช้เครื่องมือวัดระยะการยุบตัวเพื่อใช้ในการหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อ ผลที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อการอนุรักษ์โบราณสถานของไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งโบราณสถานในเชียงใหม่

คำสำคัญ: กำลังรับแรงอัด, ค่าคงที่ยืดหยุ่น, เชียงใหม่, สมบัติทางกล, อิฐโบราณ, อิฐก่อรูปแบบปริซึม

Abstract

This study aims to identify the mechanical properties of ancient bricks from the historical building in Chiang Sean. The mechanical properties investigated in the laboratory include the density, porosity, and compressive strength of bricks as a cube. This study also presents the experimental method for investigating the compressive strength and elastic modulus of substitution masonry prism with the binder. The specimen for this experiment was supported by the Department of Fine Art, by the substitution bricks made from the Department of Fine Art

guidelines for use in the Thai historical structure preservation project. The binder of the masonry prism is slaked lime with a mixture of white cement to slack lime to sand equal 1:8:24. The masonry prism specimen is composed of 6 flatwise rectangular prism shape bricks with the dimension 15x30x5 cm³. This experiment uses the compressometer setting with the masonry prism to investigate the elastic modulus of the substitution masonry prisms stack. The result obtained from this study benefits ancient Thai building preservation, especially the historical building in Chiang Sean.

Keywords: compressive strength, elastic modulus, Chiang Sean, mechanical properties, ancient brick, masonry prism

1. คำนำ

โบราณสถานของไทยมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประเทศไทย เป็นแหล่งสร้างรายได้จากการเป็นแหล่งท่องเที่ยว โดยยังคงคุณค่าในแง่ของการเป็นแหล่งศึกษาด้านประวัติศาสตร์ โบราณคดี ศิลปะวัฒนธรรม สถาปัตยกรรม และวิศวกรรม ด้วยอายุที่ยาวนานของโบราณสถานทำให้เกิดการเสื่อมสภาพในโครงสร้างบางส่วนซึ่งวัสดุหลักส่วนใหญ่ของโบราณสถานคืออิฐ ซึ่งในการบูรณะซ่อมแซมโบราณสถานต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของวัสดุที่จะมาใช้ทดแทนเพื่อให้โบราณสถานยังคงคุณค่าทางด้านประวัติศาสตร์ต่อไป ดังนั้นการศึกษสมบัติทางกลของวัสดุทดแทนสำหรับการอนุรักษ์โบราณสถานจึงมีความสำคัญและมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาพฤติกรรมของวัสดุอย่างต่อเนื่อง

นวลลักษณ์ วัสสันตชาติ [1] ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบที่พบในโบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา เปรียบเทียบกับปูนสมัยใหม่ที่กรมศิลปากรกำหนดสำหรับใช้ในการบูรณะซ่อมแซมโบราณสถาน โดยสรุปไว้ว่าปูนสอและปูนฉาบในโบราณสถานแต่ละแหล่งมีคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลแตกต่างกัน จึงจำเป็นที่จะต้อง

ศึกษาคุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบที่เหมาะสมสำหรับการอนุรักษ์โบราณสถานนั้นๆ

สุดชาย พานสุวรรณ [2] ได้ทำการศึกษาถึงความสามารถในการรับแรงของอิฐโบราณจากโบราณทั้ง 8 แหล่ง และอิฐทดแทนที่ใช้ในการบูรณะซ่อมแซมโบราณสถาน ได้สรุปไว้ว่ากำลังรับแรงอัด และค่าคงที่ยึดหยุ่นของอิฐจากโบราณสถานแต่ละแหล่งยังมีความแตกต่างกันอยู่มาก

สุทัศน์ และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาสมบัติอิฐ ปูนก่อ และอิฐก่อ โดยมีจำนวนตัวอย่างจากโบราณสถานต่างๆ 8 แหล่ง โดยได้ทำการสรุปผลการศึกษาก่อนเป็นฐานข้อมูลวัสดุจากแหล่งโบราณสถานแต่ละแห่ง เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์และประเมินโบราณสถาน ในข้อมูลของแต่ละแห่งจะประกอบไปด้วย ความพรุน อัตราการระเหยของน้ำผ่านวัสดุ กำลังรับแรงอัด และโมดูลัสยืดหยุ่น ของวัสดุแต่ละแห่ง

สุนัย และคณะ [4] ได้ทำการทดสอบเพื่อหาสมบัติทางกลของอิฐทดแทนเพื่ออนุรักษ์โบราณสถานของไทย โดยนำเสนอผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐทั้งในรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบและรูปแบบลูกบาศก์ และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของอิฐและความหนาแน่นของอิฐ

สุรพิศ และคณะ [5] ได้ทำการทดสอบหาลำดับรับแรงอัดและค่าคงที่ยึดหยุ่นของอิฐก่อโบราณและอิฐก่อทดแทนรูปทรงปริซึม โดยตัวอย่างการทดสอบผลิตขึ้นตามแนวทางที่กรมศิลปากรกำหนดและใช้ในโครงการอนุรักษ์วัดกระเจี โดยได้ทำการทดสอบอิฐก่อทดแทน 2 รูปแบบได้แก่ อิฐก่อที่ไม่ใช้วัสดุประสาน และอิฐก่อที่ใช้วัสดุประสาน

จากตัวอย่างงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นล้วนระบุตรงกันว่าสมบัติวัสดุอิฐโบราณของไทยมีความแตกต่างกันอยู่มากตามสถานที่และอายุของโบราณสถาน ประกอบกับข้อมูลสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโบราณและวัสดุทดแทนที่ใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานของไทยยังมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องรวบรวมข้อมูลและทดสอบสมบัติของวัสดุโบราณจากแหล่งอื่นๆเพิ่มเติม เพื่อให้ได้เป็นฐานข้อมูลทางวิศวกรรมสำหรับวัสดุที่จะใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานของไทยต่อไป

การศึกษานี้ทำการทดสอบความหนาแน่นและความพรุน ทดสอบกำลังรับแรงอัดในรูปแบบลูกบาศก์ของอิฐโบราณจากโบราณ 4 แห่งในเชียงใหม่ ได้แก่ 1. วัดป่าสัก 2. วัดพระธาตุจอมกิตติ 3. วัดพระธาตุเจดีย์หลวง 4. วัดพระธาตุสองพี่น้อง โดยได้พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับกำลังรับแรงอัดและความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับกำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณ นอกจากนี้ยังทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดและค่าคงที่ยึดหยุ่นของอิฐก่อทดแทนในรูปแบบปริซึมโดยมีวัสดุประสานเป็นปูนก่อ โดยอัตราส่วนผสมสำหรับปูนก่อที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้คือ 1:8:24 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ขาว ปูนหมัก และทรายตามลำดับ (Wonganan และคณะ [6]) ซึ่งผลการศึกษาสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลทางวิศวกรรมด้านวัสดุโบราณและวัสดุทดแทนสำหรับการบูรณะซ่อมแซมโบราณสถานต่อไปในอนาคต

2. วัสดุและการเตรียมตัวอย่าง

2.1 วัสดุทดสอบ

2.1.1 อิฐโบราณ (Ancient Bricks)

อิฐโบราณสำหรับการศึกษานี้หมายถึงอิฐที่ใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานในอดีตโดยอิฐโบราณที่นำมาใช้งานทดสอบครั้งนี้เป็นการเก็บตัวอย่างวัสดุมาจากบริเวณพื้นที่แหล่งโบราณสถานจริงซึ่งเป็นเศษชิ้นส่วนวัสดุที่คงเหลือจากงานอนุรักษ์โบราณสถานนั้นๆ โดยความอนุเคราะห์ของกรมศิลปากรเพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ โดยอิฐโบราณที่ใช้ในการทดสอบนี้ได้รับมาจากพื้นที่โบราณสถาน 4 แห่งในเชียงใหม่ ได้แก่ 1. วัดป่าสัก 2. วัดพระธาตุจอมกิตติ 3. วัดพระธาตุเจดีย์หลวง 4. วัดพระธาตุสองพี่น้อง ขนาดของตัวอย่างวัสดุจะมีแตกต่างกันตามแหล่งที่มา รูปที่ 1 แสดงถึงลักษณะและขนาดของตัวอย่างอิฐโบราณ



รูปที่ 1 ตัวอย่างอิฐโบราณ จากวัดป่าสัก

2.1.2 อิฐทดแทน (Substitution Bricks)

อิฐทดแทนคืออิฐที่ผลิตขึ้นมาใหม่สำหรับใช้ในงานบูรณะซ่อมแซมโบราณสถาน ผลิตโดยผ่านกระบวนการผลิตแบบโบราณตามข้อกำหนดของกรมศิลปากรเพื่อใช้ในการบูรณะซ่อมแซมโบราณสถานในเขตอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา โดยอิฐทดแทนที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้มีขนาด 15x30x5 ซม.

2.1.3 อิฐก่อทดแทน (Substitution Masonry)

คือการนำอิฐทดแทนมาก่อซ้อนกันตามแนวราบทั้งหมด 6 แผ่นในระหว่างชั้นอิฐจะมีปูนก่อเป็นวัสดุประสานชั้นละประมาณ 1 ซม. ก่อในรูปแบบปริซึมสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Masonry prism) ขนาด 15x30x35 ซม.³ อิฐก่อทดแทนในงานทดสอบนี้คืออิฐก่อทดแทนแบบมีวัสดุประสานเป็นปูนก่อทั้งหมด 3 ตัวอย่าง มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างอิฐก่อทดแทนรูปแบบปริซึมแบบมีวัสดุประสานเป็นปูนก่อ

2.1.4 ปูนก่อ (Substitution Mortars)

ปูนก่อที่ใช้ในงานทดสอบนี้ผลิตขึ้นตามอัตราส่วนผสม 1:8:24 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ขาว ปูนหมัก และทรายตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวเป็นอัตราส่วนที่กรมศิลปากรแนะนำให้ใช้สำหรับการผสมปูนก่อเพื่อใช้ในการบูรณะซ่อมแซมโบราณสถาน [1,3,6]

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบสำหรับอิฐโบราณ

เนื่องจากจำนวนตัวอย่างอิฐโบราณมีอยู่อย่างจำกัด จึงเลือกที่จะทำการทดสอบกำลังอัดของอิฐโบราณในรูปแบบลูกบาศก์ โดยการนำอิฐโบราณเต็มแผ่นมาตัดและตกแต่งให้อยู่ในรูปทรงลูกบาศก์ และทำการขัดผิวตัวอย่างให้มีความเรียบและมีระดับที่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อให้ตัวอย่างทดสอบมีความสามารถในการถ่ายน้ำหนักได้อย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 3 ตัวอย่างอิฐโบราณที่นำมาตัดแต่งและขัดผิว

3. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การศึกษานี้ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของอิฐโบราณและอิฐทดแทนที่ใช้สำหรับงานบูรณะซ่อมแซมโบราณสถาน โดยรายละเอียดของกระบวนการทดสอบในห้องปฏิบัติการแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

3.1 การทดสอบความหนาแน่นและความพรุน

การทดสอบความหนาแน่นของอิฐสามารถหาได้ 2 วิธี วิธีแรกคือการทดสอบหาความหนาแน่นแห่งที่คำนวณจากปริมาตรของขนาดตัวอย่าง ซึ่งสามารถหาได้โดยการวัดขนาดของตัวอย่างและชั่งน้ำหนักหลังจากอบแห้ง และอีกวิธีคือการหาความหนาแน่นแห่งที่คำนวณปริมาตรจากการแทนที่ด้วยน้ำจะใช้หลักการของแรงลอยตัวเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยเริ่มต้นจากนำตัวอย่างมาอบให้แห้งด้วยเตาอบ 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักหลังจากอบ จากนั้นนำไปแช่น้ำทิ้งไว้ดังแสดงในรูปที่ 4 แล้วทำการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างใน

สภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ แล้วจึงนำตัวอย่างอิฐไปชั่งน้ำหนักในน้ำ โดยอ้างอิงวิธีการคำนวณจาก ASTM C642-13 [7]



รูปที่ 4 แช่น้ำตัวอย่างอิฐโบราณ 24 ชม. สำหรับทดสอบหาความหนาแน่น

3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดอิฐโบราณ

งานทดสอบนี้เลือกใช้การทดสอบกำลังรับแรงอัดอิฐโบราณของอิฐในรูปแบบลูกบาศก์ โดยตัวอย่างทดสอบทุกตัวอย่างผ่านการทดสอบหาความหนาแน่นและความพรุนมาก่อน จึงนำมาทดสอบกำลังอัดโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดที่มีความละเอียดสูง ขั้นตอนการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเริ่มจากวางตัวอย่างทดสอบให้อยู่กึ่งกลางของแท่นรองรับ แล้วใช้แผ่นเหล็กวางด้านบนของตัวอย่างทดสอบเพื่อกระจายน้ำหนักที่มาจากเครื่องทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5 ด้วยอัตราเร็วในการกด 0.5 มม./นาที

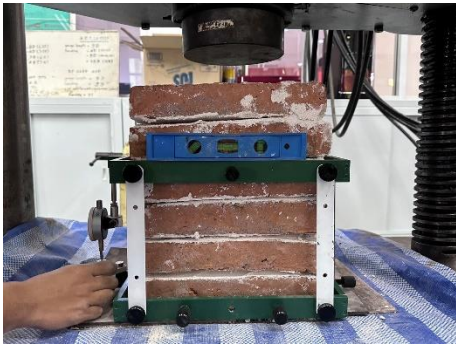


รูปที่ 5 ติดตั้งตัวอย่างทดสอบบนเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดความละเอียดสูง

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดอิฐก่อดแทน

ทำการทดสอบกำลังอัดของอิฐก่อดแทนผ่านเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ด้วยอัตราเร็วในการกด 5 มม./นาที โดยที่จะติดตั้งเครื่องมือวัดระยะการยุบตัว (Compressometer) ไปด้วยในขั้นตอนของการติดตั้งตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6 โดยก่อนเริ่มทำการทดสอบจะนำแผ่นเหล็กและแผ่นยางรองทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างเพื่อทำการกระจายน้ำหนักจากเครื่องให้ลงผิวของตัวอย่างทดสอบอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากความสูงของอิฐก่อตัวอย่างส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อทำให้ต้องปรับแก้กำลังรับอัดโดยคำนึงถึงอัตราส่วน h_p/t_p

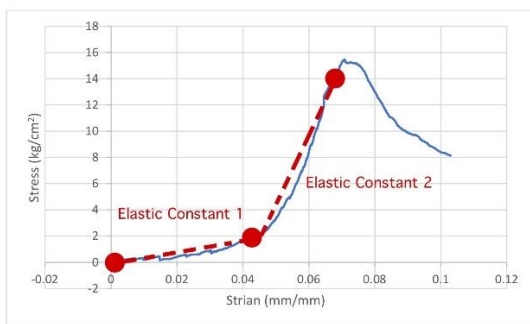
ซึ่งคืออัตราส่วนความสูงต่อความกว้างด้านที่น้อยสุดตามมาตรฐาน ASTM C1314-18 [8]



รูปที่ 6 ติดตั้งตัวอย่างทดสอบอิฐก่อพร้อมเครื่องมือวัดระยะยุบตัว

3.4 การทดสอบค่าคงที่ยืดหยุ่น

การทดสอบหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อทดแทนจะทำการทดสอบไปพร้อมกับการทดสอบกำลังอัดของอิฐก่อทดแทนตัวอย่างด้วยเครื่องมือวัดระยะการยุบตัว (Compressometer) ซึ่งพัฒนาขึ้นมาสำหรับงานทดสอบหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อโดยเฉพาะและใช้ควบคู่ไปกับทรานสดิวส์เซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนียวผ่านแบบเชิงเส้น (Linear Variable Differential) ผ่านเครื่องบันทึกข้อมูลแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Data Logger) จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของอิฐก่อมีลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้น สุรพัทธ์ และคณะ [5] ได้นำเสนอแนวทางการหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อไว้เป็น 2 ช่วง ดังรูปที่ 7 ช่วงแรกเป็นค่า E1 และช่วงที่ 2 เป็นค่า E2 โดยตำแหน่งของจุดปลายของทั้งสองช่วงพิจารณาจากจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงของความชันสูงสุดของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของอิฐก่อ



รูปที่ 7 ค่าคงที่ยืดหยุ่นทั้ง 2 ช่วงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของอิฐก่อ

4. ผลการศึกษา

ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของอิฐโบราณจากโบราณสถานเชียงใหม่ ได้แก่การทดสอบความหนาแน่นและความพรุนของอิฐโบราณและทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณในรูปแบบลูกบาศก์ กำลังรับแรงอัดและค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อทดแทนแบบมีวัสดุประสานเป็นปูนก่อ

4.1 ผลการทดสอบอิฐโบราณ

4.1.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นและความพรุน

จากผลการทดสอบความหนาแน่นและความพรุนของอิฐโบราณจากโบราณสถานในเชียงใหม่ในตารางที่ 1 คือผลการทดสอบของตัวอย่างอิฐโบราณจากวัดป่าสักจำนวน 6 ตัวอย่าง มีค่าความหนาแน่นแห้งที่หาจากการแทนที่น้ำของอิฐอยู่ในช่วง 1.44 ก./ซม.³ – 1.47 ก./ซม.³ ความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 1.46 ก./ซม.³ และความพรุนอยู่ในช่วง 36.82 % - 38.41 % โดยมีความพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 37.60 %

จากตารางที่ 2 คือผลการทดสอบของตัวอย่างอิฐโบราณจากวัดพระธาตุจอมกิตติจำนวน 5 ตัวอย่าง มีค่าความหนาแน่นแห้งที่หาจากการแทนที่น้ำของอิฐอยู่ในช่วง 1.49 ก./ซม.³ – 1.52 ก./ซม.³ ความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 1.51 ก./ซม.³ และความพรุนอยู่ในช่วง 38.00 % - 39.45 % โดยมีความพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 38.72 %

จากตารางที่ 3 คือผลการทดสอบของตัวอย่างอิฐโบราณจากวัดพระธาตุเจดีย์หลวงจำนวน 5 ตัวอย่าง มีค่าความหนาแน่นแห้งที่หาจากการแทนที่น้ำของอิฐอยู่ในช่วง 1.54 ก./ซม.³ – 1.68 ก./ซม.³ ความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 1.63 ก./ซม.³ และความพรุนอยู่ในช่วง 28.47 % - 34.74 % โดยมีความพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 31.14 %

จากตารางที่ 4 คือผลการทดสอบของตัวอย่างอิฐโบราณจากวัดพระธาตุสองพี่น้องจำนวน 5 ตัวอย่าง มีค่าความหนาแน่นแห้งที่หาจากการแทนที่น้ำของอิฐอยู่ในช่วง 1.45 ก./ซม.³ – 1.47 ก./ซม.³ ความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 1.47 ก./ซม.³ และความพรุนอยู่ในช่วง 33.98 % - 34.81 % โดยมีความพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 34.33 %

ในตารางที่ 5 คือการนำผลการทดสอบครั้งนี้รวบรวมเข้ากับฐานข้อมูลสมบัติทางกายภาพและทางกลของอิฐโบราณจากงานวิจัยในอดีต [2-4] โดยส่วนมากจะเป็นอิฐจากโบราณสถานในเขตอุทยานประวัติศาสตร์พระนครหรืออยุธยา

4.1.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณ

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณจากโบราณสถานในเชียงใหม่โดยทำการทดสอบตัวอย่างในรูปแบบลูกบาศก์ผ่านเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดความละเอียดสูง จากตารางที่ 1 กำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณจากวัดป่าสักในรูปแบบลูกบาศก์จำนวน 6 ตัวอย่างอยู่ในช่วงระหว่าง 52.27 กก./ซม.² – 76.72 กก./ซม.² และมีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 68.13 กก./ซม.² โดยที่ขนาดของตัวอย่างทดสอบมีความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 3.65 ซม.

จากตารางที่ 2 กำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณจากวัดพระธาตุจอมกิติติ ในรูปแบบลูกบาศก์จำนวน 5 ตัวอย่างอยู่ในช่วงระหว่าง 30.13 กก./ซม.² – 49.36 กก./ซม.² และมีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 41.12 กก./ซม.² โดยที่ขนาดของตัวอย่างทดสอบมีความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 3.62 ซม.

จากตารางที่ 3 กำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณจากวัดพระธาตุเจดีย์หลวงในรูปแบบลูกบาศก์จำนวน 5 ตัวอย่างอยู่ในช่วงระหว่าง 140.96 กก./ซม.² – 249.99 กก./ซม.² และมีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 208.70 กก./ซม.² โดยที่ขนาดของตัวอย่างทดสอบมีความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 3.66 ซม.

จากตารางที่ 4 กำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณจากวัดพระธาตุสองพี่น้อง ในรูปแบบลูกบาศก์จำนวน 5 ตัวอย่างอยู่ในช่วงระหว่าง 51.78 กก./ซม.² – 60.71 กก./ซม.² และมีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 54.74 กก./ซม.² โดยที่ขนาดของตัวอย่างทดสอบมีความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 3.61 ซม.

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณทั้ง 4 แหล่งที่มาพบว่าค่าของกำลังรับแรงอัดของแต่ละแหล่งมีค่าแตกต่างกันไปตามแหล่งที่มา และพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มสูงเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นที่มากขึ้นตั้งแต่ที่ศูนย์ และคณะ [4] ได้กล่าวไว้ โดยรูปที่ 8 ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างอิฐโบราณทั้งหมดที่ได้ทำการทดสอบ รูปที่ 9 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างอิฐโบราณจากวัดพระธาตุเจดีย์หลวง นอกจากนี้ยังพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มที่จะลดลงตามค่าความพรุนที่เพิ่มขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 10 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างอิฐโบราณทั้งหมดในการทดสอบนี้

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบอิฐโบราณจากวัดป่าสัก

| ตัวอย่าง | ρ_b (ก./ซม. ³) | ρ_d (ก./ซม. ³) | ความพรุน P (%) | กำลังรับแรงอัด σ (กก./ซม. ²) |
|----------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------|--|
| A1 | 1.47 | 1.34 | 37.12 | 54.67 |
| A2 | 1.47 | 1.40 | 36.82 | 76.56 |
| A3 | 1.44 | 1.36 | 38.41 | 52.27 |
| A4 | 1.45 | 1.39 | 37.79 | 76.30 |
| A5 | 1.46 | 1.40 | 37.91 | 72.27 |
| A6 | 1.45 | 1.39 | 37.58 | 76.72 |
| เฉลี่ย | 1.46 | 1.38 | 37.60 | 68.13 |

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบอิฐโบราณจากวัดพระธาตุจอมกิติติ

| ตัวอย่าง | ρ_b (ก./ซม. ³) | ρ_d (ก./ซม. ³) | ความพรุน P (%) | กำลังรับแรงอัด σ (กก./ซม. ²) |
|----------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------|--|
| B1 | 1.51 | 1.40 | 39.45 | 49.36 |
| B2 | 1.51 | 1.39 | 38.00 | 30.13 |
| B3 | 1.50 | 1.37 | 38.85 | 35.44 |
| B4 | 1.49 | 1.35 | 39.10 | 45.05 |
| B5 | 1.52 | 1.40 | 38.21 | 45.61 |
| เฉลี่ย | 1.51 | 1.38 | 38.72 | 41.12 |

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบอิฐโบราณจากวัดพระธาตุเจดีย์หลวง

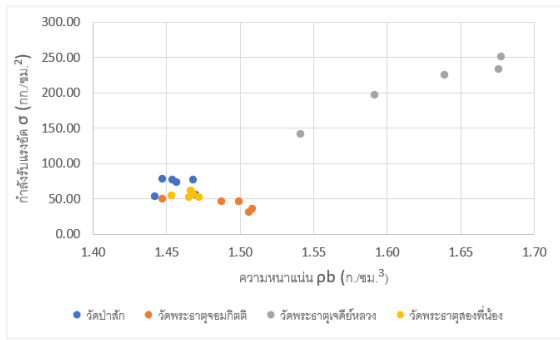
| ตัวอย่าง | ρ_b (ก./ซม. ³) | ρ_d (ก./ซม. ³) | ความพรุน P (%) | กำลังรับแรงอัด σ (กก./ซม. ²) |
|----------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------|--|
| C1 | 1.64 | 1.75 | 30.73 | 224.02 |
| C2 | 1.68 | 1.61 | 29.40 | 232.25 |
| C3 | 1.68 | 1.62 | 28.47 | 249.99 |
| C4 | 1.59 | 1.50 | 32.38 | 196.25 |
| C5 | 1.54 | 1.48 | 34.74 | 140.96 |
| เฉลี่ย | 1.63 | 1.59 | 31.14 | 208.70 |

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบอิฐโบราณจากวัดพระธาตุสองพี่น้อง

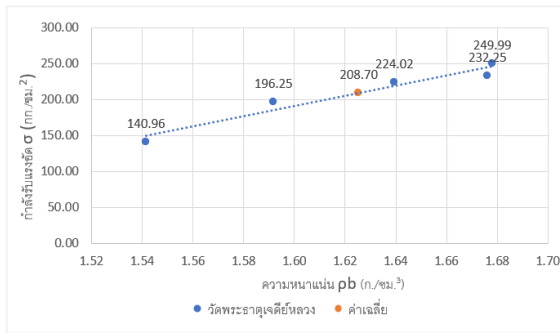
| ตัวอย่าง | ρ_b (ก./ซม. ³) | ρ_d (ก./ซม. ³) | ความพรุน P (%) | กำลังรับแรงอัด σ (กก./ซม. ²) |
|----------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------|--|
| D1 | 1.47 | 1.41 | 34.42 | 60.61 |
| D2 | 1.47 | 1.43 | 34.42 | 51.96 |
| D3 | 1.45 | 1.37 | 33.98 | 53.43 |
| D4 | 1.47 | 1.38 | 34.05 | 55.93 |
| D5 | 1.47 | 1.38 | 34.81 | 51.78 |
| เฉลี่ย | 1.47 | 1.39 | 34.33 | 54.74 |

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบของอิฐโบราณทั้งหมด

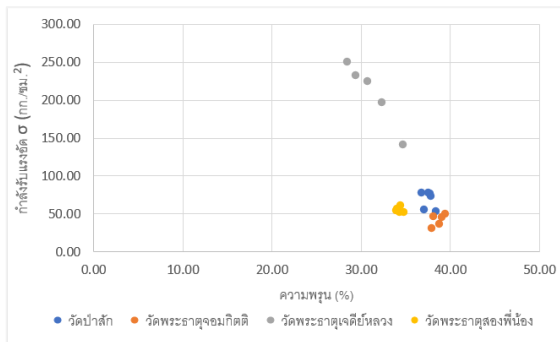
| ตัวอย่าง | ρ_b (ก./ซม. ³) | P (%) | กำลังรับแรงอัด σ (กก./ซม. ²) |
|----------------------|------------------------------------|-------|--|
| วัดป่าสัก | 1.44 | 37.60 | 68.13 |
| วัดพระธาตุจอมกิติติ | 1.51 | 38.72 | 41.12 |
| วัดพระธาตุเจดีย์หลวง | 1.63 | 31.14 | 208.70 |
| วัดพระธาตุสองพี่น้อง | 1.47 | 34.33 | 54.74 |
| วัดไชยวัฒนาราม | 1.63 | 31.3 | 22.8 |
| วัดพระศรีสรรเพชญ์ | 1.78 | 29.7 | 37 |
| วัดศาลาปูน | 1.51 | 33.1 | 27.5 |
| พระราชวังโบราณ | 1.86 | 31.9 | 22 |
| เวียงนครเกษม | 1.47 | 34.9 | 35.4 |
| วัดราชบพิธ | 1.4 | 34.3 | 25.1 |
| วัดท่าตอ | 1.64 | 32.1 | 30.8 |
| วัดกระเจี | 1.56 | 32.8 | 67.2 |
| วัดบ้านลุมพลี | 1.37 | - | 40.12 |
| ภูเขาทอง | 1.38 | - | 51.61 |
| วัดขุนแสน | 1.4 | - | 57.19 |
| วัดหน้าพระเมรุ | 1.36 | - | 39.54 |
| วัดพระราม | 1.46 | - | 37.58 |
| วัดกุฎีดาว | 1.46 | - | 44.01 |
| วัดสมณโกฏิ | 1.48 | - | 50.12 |
| วัดวรเชษฐาราม | 1.39 | - | 49.97 |
| ป้อมเพชร | 1.32 | - | 39.6 |



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและกำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณในรูปแบบลูกบาศก์



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและกำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณของตัวอย่างอิฐโบราณวัดพระธาตุเจดีย์หลวง



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณในรูปแบบลูกบาศก์

4.2 ผลการทดสอบอิฐก่อทดแทน

4.2.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและค่าคงที่ยึดหยุ่นของอิฐก่อทดแทน

จากตารางที่ 6 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อทดแทนแบบมีวัสดุประสานเป็นปูนก่อกับทั้ง 3 ตัวอย่างโดยแสดงแรงกระทำสูงสุดที่กระทำบนอิฐก่อและค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐก่อก่อนทำการปรับแก้ตาม ASTM C1314-18 [8] ขนาดของอิฐก่อทดแทนที่ทำการทดสอบมีขนาดประมาณ 15x30x35 ซม. ซึ่งขนาดมีการคาดเคลื่อนไปเนื่องจากขนาดของอิฐทดแทนแต่ละแผ่นที่นำมาใช้นั้นไม่ได้มีขนาดตรงกับ 15x30x5 ซม.พอดี จึงทำให้อัตราส่วนความสูงต่อด้านกว้างที่น้อยที่สุด (hp/tp) ที่ใช้สำหรับการ

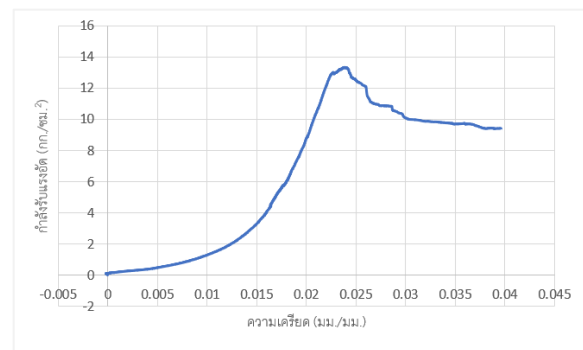
ปรับแก้ค่ากำลังรับแรงอัดนั้นแตกต่างกันไปตามตัวอย่างทดสอบนั้น ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐก่อทดแทนหลังจากการปรับแก้ในช่วง 9.67 กก./ซม.² – 13.36 กก./ซม.² มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 11.23 กก./ซม.² ในตารางที่ 7 แสดงถึงค่าคงที่ยึดหยุ่นทั้งสองช่วง E1 และ E2 ของอิฐก่อทดแทนทั้ง 2 ตัวอย่าง ค่าคงที่ยึดหยุ่นในช่วงแรก E1 มีค่าอยู่ในช่วง 119.06 กก./ซม.² – 143.40 กก./ซม.² และค่าคงที่ยึดหยุ่นในช่วงที่สอง E2 มีค่าอยู่ในช่วง 594.71 กก./ซม.² – 940.91 กก./ซม.²

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อทดแทน

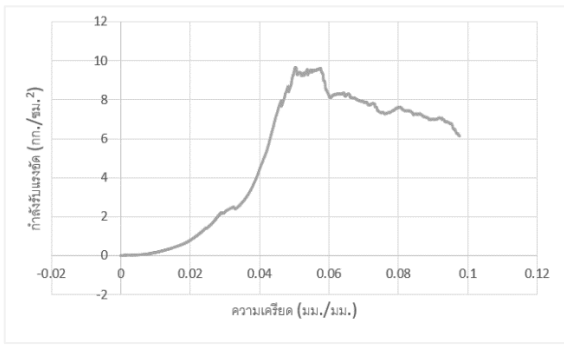
| ตัวอย่าง | แรงกระทำสูงสุด (กก.) | กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.2) | อัตราส่วน hp/tp | ค่าปรับแก้ hp/tp | กำลังรับแรงอัดหลังปรับแก้ (กก./ซม.2) |
|----------|----------------------|---------------------------|-----------------|------------------|--------------------------------------|
| S1 | 5551.08 | 12.80 | 2.56 | 1.04 | 13.36 |
| S2 | 4144.41 | 9.48 | 2.25 | 1.02 | 9.67 |
| S3 | 4435.18 | 10.36 | 2.35 | 1.03 | 10.65 |

รูปที่ 11-12 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างอิฐทดแทน S1 และ S2 ตามลำดับ ซึ่งนำมาใช้ในการพิจารณาหาตำแหน่งของค่าคงที่ยึดหยุ่นทั้ง 2 ช่วงของแต่ละตัวอย่างทดสอบ รูปที่ 13 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างอิฐทดแทนทั้ง 2 ตัวอย่างมาเปรียบเทียบกัน

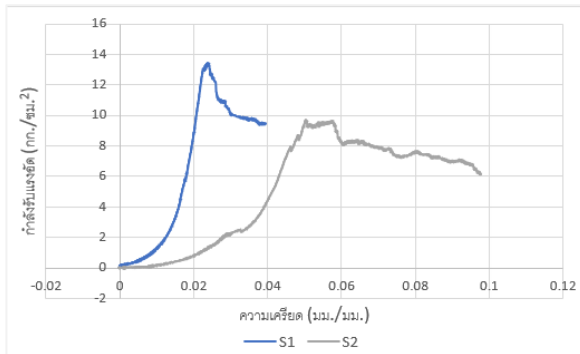
เมื่อพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐก่อทดแทนในการทดสอบครั้งนี้ใช้วัสดุประสานเป็นปูนก่อบริเวณเปรียบเทียบกับรายงานของสุทัศน์และคณะ [3] ที่ได้ทำการทดสอบอิฐก่อทดแทนที่ใช้วัสดุประสานเป็นปูนหมักร่วมกับเถ้าแกลบ และเถ้าถ่านหินตามแต่ละส่วนผสม พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน โดยส่วนผสมของปูนก่อก่อนที่ใช้ในการทดสอบนี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ขาว ปูนหมัก และทราย ผลการศึกษาได้ชี้ให้เห็นว่ากำลังอัดของอิฐก่อมีผลจากตัวอิฐมากกว่าตัววัสดุประสาน



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อ (S1)



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อ (S2)



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อ (S1และS2)

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อทดแทน

| ตัวอย่าง | กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.²) | E1 | E2 |
|----------|---------------------------|--------|--------|
| S1 | 13.36 | 143.40 | 940.91 |
| S2 | 9.67 | 119.06 | 594.71 |

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ได้นำเสนอผลการทดสอบสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของอิฐโบราณจากโบราณสถาน 4 แห่งในเชียงใหม่ ได้แก่ 1.วัดป่าสัก 2.วัดพระธาตุจอมกิตติ 3.วัดพระธาตุเจดีย์หลวง 4.วัดพระธาตุสองพี่น้อง และผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อทดแทนที่มีวัสดุประสานเป็นปูนก่อ โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- ค่าความหนาแน่นแห้งที่คำนวณจากการแทนที่ปริมาตรน้ำของอิฐโบราณจากวัดป่าสักมีค่าอยู่ในช่วง 1.44 กก./ซม.³ – 1.47 กก./ซม.³ อิฐโบราณจากวัดพระธาตุจอมกิตติอยู่ในช่วง 1.49 กก./ซม.³ – 1.52 กก./ซม.³ อิฐโบราณจากวัดพระธาตุเจดีย์หลวงอยู่ในช่วง 1.54 กก./ซม.³ – 1.68 กก./ซม.³ อิฐโบราณจากวัดพระธาตุสองพี่น้องอยู่ในช่วง 1.45 กก./ซม.³ – 1.47 กก./ซม.³
- ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณจากวัดป่าสักมีค่าอยู่ในช่วง 52.27 กก./ซม.² – 76.72 กก./ซม.² อิฐโบราณจากวัดพระธาตุ

จอมกิตติอยู่ในช่วง 30.13 กก./ซม.² – 49.36 กก./ซม.² อิฐโบราณจากวัดพระธาตุเจดีย์หลวงอยู่ในช่วง 140.96 กก./ซม.² – 249.99 กก./ซม.² อิฐโบราณจากวัดพระธาตุสองพี่น้องอยู่ในช่วง 51.78 กก./ซม.² – 60.71 กก./ซม.²

- ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐก่อทดแทนแบบมีวัสดุประสานเป็นปูนก่อมีค่าอยู่ในช่วง 9.67 กก./ซม.² – 13.36 กก./ซม.²
- ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของอิฐก่อมีลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถประมาณเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงยืดหยุ่นให้เป็นเส้นตรง 2 ช่วงได้ ซึ่งสามารถคำนวณเป็นค่าคงที่ยืดหยุ่น 2 ค่าได้แก่ E1 และ E2 โดยอิฐก่อแทนมีค่าคงที่ยืดหยุ่นช่วงแรก E1 อยู่ในช่วง 119.06 กก./ซม.² – 143.40 กก./ซม.² และค่าคงที่ยืดหยุ่นช่วงที่สอง E2 อยู่ในช่วง 594.71 กก./ซม.² – 940.91 กก./ซม.²

การศึกษานี้สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลเพื่อประกอบการอนุรักษ์โบราณสถานของไทย อย่างไรก็ตามเนื่องจากสมบัติของวัสดุสำหรับโบราณสถานแต่ละแห่งมีความแตกต่างกันมาก จึงควรที่จะมีการเก็บข้อมูลและทำการทดสอบในลักษณะเดียวกันนี้กับโบราณสถานแห่งอื่นๆเพิ่มเติม

กิตติกรรมประกาศ

งานทดสอบครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ทุนสนับสนุนด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ พ.ศ.2566 ภายใต้รหัสโครงการ FRB660073/0164 (เทคโนโลยีการก่อสร้างขั้นสูงและยั่งยืนสำหรับ Thailand 4.0) และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และได้รับการสนับสนุนวัสดุทดสอบจากอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา และพิพิธภัณฑ์สถานแห่งชาติ เชียงแสน และสำนักศิลปากรที่ 7 เชียงใหม่

เอกสารอ้างอิง

- นวลลักษณ์ วัสสันตชาติ (2561). ปูนในโบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาแห่งมรดกโลก. คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศิลปากร, ประเทศไทย.
- สุดชาย พานสุวรรณ (2543). การวิเคราะห์โบราณสถานก่ออิฐในเชิงวิศวกรรม. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ประเทศไทย.
- สุทัศน์ สีสถาวิวัฒน์, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัยณรงค์ อธิสกุล, รักติพงษ์ สหมิตรมงคล และเสน่ห์ มหาผล (2562). โครงการ พัฒนารูข้อมูลทางวิศวกรรมเพื่อการประเมินและติดตาม สภาพโครงสร้างโบราณสถานของไทย. สำนักงานกองทุน สนับสนุนการวิจัย, 135-140.

- [4] สุนัย โตศิริมงคล, พีรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, สุทัศน์ สีสาทวีวัฒน์, ชัยณรงค์ อธิสกุล (2563). สมบัติทางกล ของอิฐทดแทน เพื่อการอนุรักษ์โบราณสถานของไทย . การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 , 15-17 กรกฎาคม, ชลบุรี, ประเทศไทย.
- [5] สุรพัศ นิธิปฏิคม, สุนัย โตศิริมงคล, ชัยณรงค์ อธิสกุล, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, สุทัศน์ สีสาทวีวัฒน์, พีรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย (2564). กำลังอัดและค่าคงที่ยึดหยุ่นของอิฐก่อโบราณ และอิฐก่อทดแทนรูปแบบปริซึม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26 , 23-25 มิถุนายน, ระยอง, ประเทศไทย.
- [6] Wonganan, N., Athisakul, C., Mahasuwanchai, P., Tanchirapat, W., Sahamitmongkol, R. and Leelataviwat, S. (2020). Ancient Materials and Substitution Materials Used in Thai Historical Masonry Structure Preservation. *Journal of Renewable Materials*, Vol. 6, No. 2, pp. 179-204.
- [7] ASTM C642, 2013. *Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [8] ASTM C1314, 2018. *Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms*.ASTM International, West Conshohocken, PA.