

สมบัติทางกลของอิฐทดแทนเพื่อการอนุรักษ์โบราณสถานของไทย

Mechanical Properties of Substitution Bricks for Thai Historical Building Preservation

สุนัย โตศิริมงคล^{1*} พิรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย² วีรชาติ ตั้งจิรภัทร³ สุตัน ลีลาทวีวัฒน์⁴ และ ชัยณรงค์ อธิสกุล⁵

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

*Corresponding author; E-mail address: sunai.max@mail.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาค้นคว้านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสมบัติทางกลของอิฐทดแทนเพื่อการอนุรักษ์โบราณสถานของไทย โดยทำการทดสอบสมบัติทางกลของอิฐในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ กำลังวัสดุ ความหนาแน่น และความพรุน โดยนำเสนอผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐทั้งในรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบและอิฐรูปแบบลูกบาศก์ และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของอิฐและความหนาแน่นของอิฐทั้งในรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบและรูปแบบลูกบาศก์ นอกจากนี้ทำการประเมินผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของอิฐต่อกำลังรับแรงอัดของอิฐ รวมถึงทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของกลุ่มอิฐก่อในรูปแบบปริซึมโดยทำการเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อเดี่ยว จากการทดสอบพบว่า อิฐทดแทนมีความหนาแน่นแห้งอยู่ในช่วง 1.28 ก./ซม.³ - 1.63 ก./ซม.³ มีความพรุนอยู่ในช่วง 30.15 % - 35.14 % และค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐทดแทนรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบมีค่าสูงกว่ารูปแบบลูกบาศก์ กำลังรับแรงอัดกับความหนาแน่นมีความสัมพันธ์ต่อกัน ซึ่งท้ายที่สุดทำให้สามารถหาสมการสำหรับประมาณค่ากำลังรับแรงอัดของกลุ่มอิฐก่อในรูปแบบปริซึมได้ในรูปของค่าความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อเดี่ยว

คำสำคัญ: โบราณสถานของไทย, สมบัติทางกล, อนุรักษ์, อิฐก่อในรูปแบบปริซึม, อิฐทดแทน

Abstract

The purpose of this study is to identify the mechanical properties of the substitution bricks used for Thai historical structures preservation. The mechanical properties of bricks, such as strength, density and porosity were investigated in the laboratory. The compressive strength of brick in flatwise position and the brick cube were presented. The relationship between the compressive strength of brick and density in both flatwise position and in cubic shape were illustrated. The effect of brick shape and size on the compressive strength were evaluated. The compressive strength of the brick prisms were also investigated in comparison with the compressive strength of bricks. The results show that dry density and porosity of the substitution brick are in the range of 1.28 g/cm³ - 1.63 g/cm³ and 30.15 % - 35.14 %, respectively. The compressive strength of brick in

the flatwise position is higher than the brick cube. The experimental results also show that the compressive strength of brick depends on the density. Finally, the approximate equations for predicting the compressive strength of brick prism were derived in terms of density and compressive strength of brick.

Keywords: Brick prism, Mechanic properties, Preservation, Substitution bricks, Thai historical structures

1. บทนำ

โบราณสถาน คือ สิ่งที่มีมนุษย์สร้างขึ้นมีความเก่าแก่ เป็นแหล่งศึกษาด้านประวัติศาสตร์ ศิลปะวัฒนธรรม โบราณคดี สถาปัตยกรรม และวิศวกรรม นอกจากนี้ยังสามารถทำรายได้อย่างมากมายให้กับประเทศ โบราณสถานในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาถือเป็นมรดกทางวัฒนธรรมที่สำคัญของประเทศ ไทย โดยโบราณสถานในเขตอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาได้ขึ้นทะเบียนเป็นมรดกโลกด้านวัฒนธรรมจากองค์การยูเนสโกตั้งแต่พ.ศ. 2534 [1-2] และเป็นแหล่งท่องเที่ยวที่สำคัญในลำดับต้น ๆ ของประเทศไทย

อายุที่ยาวนานของโบราณสถานนั้นทำให้มีการเสียหายหรือเสื่อมสภาพของโครงสร้างบางส่วน ซึ่งการเสื่อมสภาพตามกาลเวลาของวัสดุก่อโบราณ เป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่ทำให้โบราณสถานเกิดการเสียหายสภาพและเกิดความเสียหายขึ้นตามกาลเวลา การบูรณะโบราณสถานจำเป็นต้องใช้อิฐทดแทนที่มีสมบัติทางกลใกล้เคียงกับอิฐโบราณมากที่สุด ดังนั้นการศึกษาสมบัติทางกลของอิฐทดแทนที่ใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานของไทยจึงมีความสำคัญและมีความจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมข้อมูลอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ ความเสียหายหรือการเสื่อมสภาพของวัสดุเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น การเสื่อมสภาพเนื่องจากฝนกรด โดย Zheng และคณะ พบว่า [3] ฝนกรดมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของอิฐ หรือในประเทศที่มีอุณหภูมิต่ำมากมีผลของการเสื่อมสภาพเนื่องจาก การแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันไป โดย Tang และคณะ [4] พบว่ามีปัจจัยที่สำคัญคือ จำนวนรอบการเกิด และระดับความอึมตัว เป็นต้น ปัจจัยของความเสียหายหรือการเสื่อมสภาพที่กล่าวข้างต้นล้วนส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของโครงสร้างโบราณสถาน

ทั้งนี้ วัสดุที่นำมาบูรณะโบราณสถานต้องคำนึงถึงสมบัติอื่น ๆ นอกเหนือจากกำลังรับแรงอัดด้วยเช่นกัน ทำให้ต้องทดสอบโดยนำความรู้ทางวิศวกรรมเข้ามาเกี่ยวข้องในด้านการบูรณะโบราณสถาน ซึ่งใน

ต่างประเทศมีการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของอิฐโบราณ [5-8] โดยทำการศึกษาความหนาแน่น ความพรุน การดูดซึมน้ำ กำลังรับแรงอัด โมดูลัสยืดหยุ่น เป็นต้น ตัวอย่างงานวิจัยที่ผ่านมาได้แก่ Silveira และคณะ [8] ได้ศึกษาสมบัติทางกลของอิฐโบราณจากกำแพงและบ้านพักอาศัย ในเมืองอาเวียโร ประเทศโปรตุเกส โดยเจาะตัวอย่างเป็นรูปทรงกระบอกจากนั้นนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง และโมดูลัสยืดหยุ่น พบว่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 1.17 เมกะปาสคาล กำลังรับแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 เมกะปาสคาล และโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 187 เมกะปาสคาล ซึ่งวัสดุที่ใช้ในต่างประเทศกับประเทศไทยมีขนาดและวิธีการผลิตที่แตกต่างกันจึงได้มีการศึกษาสมบัติทางกลของอิฐโบราณและอิฐทดแทนที่นำมาใช้บูรณะโบราณสถานในประเทศไทย [9-12] โดยศุคชาย [9] (2543) ศึกษาผลของกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐโบราณที่นำมาจากวัดในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาทั้ง 8 วัด เทียบกับอิฐที่ผลิตในปัจจุบัน พบว่ากำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐที่นำมาทดสอบมีความแตกต่างกันตามแหล่งที่มา ในทำนองเดียวกันสุทัศน์และคณะ [10] (2562) ได้ศึกษาสมบัติทางกลของอิฐโบราณและมอร์ตาร์โบราณที่เก็บตัวอย่างมาจากโบราณสถานในกรุงเทพมหานครและจังหวัดพระนครศรีอยุธยา รวมถึงทดสอบอิฐก่อปรีซิมซึ่งก่อโดยใช้อิฐทดแทนและปูนหมัก จากรายงานกล่าวว่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของอิฐโบราณมีความสัมพันธ์กัน โดยกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มมากขึ้นตามความหนาแน่นของอิฐที่มากขึ้น ทั้งนี้กำลังรับแรงอัดของอิฐและมอร์ตาร์โบราณมีความแตกต่างกันตามแหล่งที่มา ดังนั้นฐานข้อมูลทางวิศวกรรมของวัสดุโบราณสถานจึงมีความสำคัญและจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมอย่างต่อเนื่อง

จากข้อมูลและแนวทางศึกษาที่คณะผู้วิจัยได้เคยดำเนินการมาแล้วตามรายงานข้างต้น [10] กรมศิลปากร และอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา จึงให้ความอนุเคราะห์ให้ตัวอย่างอิฐทดแทนซึ่งผลิตตามข้อกำหนดของกรมศิลปากรเพื่อใช้ในการบูรณะโบราณสถานในเขตอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาให้กับคณะผู้วิจัย เพื่อต่อยอดผลการศึกษาเพิ่มเติมถึงสมบัติทางกลของอิฐทดแทนที่นำมาใช้นี้ โดยอิฐทดแทนที่ทำการศึกษานั้นมีลักษณะและขนาดแตกต่างกันโดยได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

การศึกษานี้ได้พิจารณาผลจากขนาดของอิฐตัวอย่างที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัด รวมถึงรูปทรงตัวอย่างอิฐระหว่างตัวอย่างแบบทรงลูกบาศก์กับตัวอย่างแบบเต็มแผ่นซึ่งมีความหนาแตกต่างกัน นอกจากนี้ได้พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับกำลังรับแรงอัดของอิฐ ตลอดจนการศึกษากำลังรับแรงดัด และกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อที่เกิดจากการเรียงอิฐเป็นชั้นที่ไม่มีการสอปูน จากนั้นนำผลการทดสอบในกรณีต่าง ๆ มาทำการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการประมาณค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐตามขนาดและความหนาแน่น รวมถึงสมการประมาณค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐก่อในกรณีที่ไม่มีการสอปูน โดยผลการศึกษานี้สามารถเป็นฐานข้อมูลที่มีประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้องกับการบูรณะโบราณสถานให้สามารถกำหนดวิธีการบูรณะได้อย่างเหมาะสมมากยิ่งขึ้น อันทำให้โบราณสถานซึ่งเป็นมรดกทางวัฒนธรรมที่สำคัญของชาติเราอยู่คู่กับประเทศไทยไปตราบนานเท่านาน

2. วัสดุและการเตรียมตัวอย่าง

2.1 วัสดุทดสอบ

อิฐทดแทนที่ใช้บูรณะโบราณสถานของไทย รวมถึงตัวอย่างอิฐโบราณที่ได้รับความอนุเคราะห์จากกรมศิลปากร โดยนำเศษตัวอย่างมาจากพื้นที่โบราณสถานแหล่งต่าง ๆ ที่อยู่ระหว่างการบูรณะ ทั้งนี้การศึกษานี้มุ่งต่อยอดผลการศึกษาของคณะผู้วิจัย [10] โดยมุ่งเน้นที่การทดสอบอิฐทดแทนเป็นหลัก

2.1.1 อิฐทดแทน (Substitution Bricks)

อิฐทดแทน คือ อิฐที่ผลิตโดยกระบวนการผลิตแบบโบราณสามารถแบ่งประเภทได้ 2 รูปแบบตามการเผาคือ เผาผืน และเผาแกลบ โดยอิฐทดแทนที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นอิฐทดแทนเผาแกลบที่ใช้บูรณะโครงสร้างโบราณสถาน ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยความอนุเคราะห์จากสำนักงานอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา วัสดุที่นำมามีขนาดที่แตกต่างกัน เนื่องจากในการบูรณะโบราณสถานต้องใช้อิฐหลายขนาดเพื่อใช้ในโครงสร้างที่มีความซับซ้อนต่างกันทำให้เกิดการลดหลั่นขนาดอิฐในการใช้งานจริง โดยกระบวนการผลิตอิฐทดแทน ผลิตตามข้อกำหนดของกรมศิลปากรเพื่อใช้ในการบูรณะโบราณสถานในเขตอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา ซึ่งตัวอย่างที่นำมาทดสอบแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ อิฐก่อเดี่ยว และอิฐก่อ

อิฐก่อเดี่ยว (Brick) แบ่งเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ อิฐรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบ (Flatwise brick) คือ อิฐรูปแบบปกติที่ไม่ได้ผ่านการตัดแต่งใด ๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 และอิฐรูปแบบลูกบาศก์ (Cubic brick) คือ อิฐเต็มแผ่นตามแนวราบที่ผ่านการตัดและตกแต่งให้ได้เป็นทรงลูกบาศก์ดังแสดงในรูปที่ 2

อิฐก่อ (Masonry) คือ การนำอิฐรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบขนาด 15x30x5 ซม. มาวางซ้อนกัน 5 ชั้น ในรูปแบบปรีซิม (Masonry prism) โดยไม่ใช้ปูนสอ ซึ่งอิฐทุกชั้นต้องผ่านการขัดผิวและปรับระดับให้มีความเรียบสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 3 และพยายามปรับแต่งเพื่อให้ได้ความสูงของอิฐก่อโดยประมาณเท่ากับ 30 ซม. เพื่อลดผลกระทบของอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างด้านที่น้อยสุด ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3 ทั้งนี้ขนาดของตัวอย่างอิฐทดแทนแต่ละรูปแบบที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแจกแจงได้ดังตารางที่ 1

2.1.2 อิฐโบราณ (Ancient Bricks)

อิฐโบราณ คือ วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างโบราณสถานในอดีต โดยอาศัยผลงานวิจัยในอดีตของคณะผู้วิจัย [10] ส่วนผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของตัวอย่างอิฐโบราณจากแหล่งต่าง ๆ ที่ผ่านการตกแต่งให้ได้ขนาด 2x2x2 ซม.³ โดยสามารถสรุปค่าสมบัติต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 2 ซึ่งความหนาแน่นตามตารางเป็นความหนาแน่นแห้งที่คำนวณปริมาตรจากการแทนที่น้ำ

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

อิฐทดแทนที่นำมาทดสอบมีผิวที่ขรุขระเมื่อนำไปทดสอบทำให้การถ่ายแรงไม่สม่ำเสมอ จึงต้องทำการขัดโดยใช้เครื่องเจียรขนาด 4 นิ้ว ใช้ใบเจียรปูน ขัดผิวตัวอย่างให้มีความเรียบและมีระดับที่สม่ำเสมอทั่วแผ่น เพื่อให้ตัวอย่างทดสอบสามารถถ่ายแรงได้อย่างสม่ำเสมอ จากนั้นนำตัวอย่างมาวัดขนาด ซึ่งน้ำหนัก หาคความหนาแน่น และความพรุนก่อนการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของตัวอย่างได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด โดยสามารถแจกแจงจำนวนตัวอย่างทดสอบของอิฐทดแทนแต่ละรูปแบบดังแสดงในตารางที่ 3 ต่อมาทำการประเมินกำลังของวัสดุเพื่อเลือกใช้เครื่องทดสอบให้เหมาะสมกับกำลังที่วัสดุรับได้ เมื่อเลือกเครื่องทดสอบที่เหมาะสมเรียบร้อยแล้ว ทำการตั้งค่าอัตราเร็วของเครื่องทดสอบและติดตั้งวัสดุทดสอบซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3



รูปที่ 1 อิฐรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบ (Flatwise brick)



รูปที่ 2 อิฐรูปแบบลูกบาศก์ (Cubic brick)



รูปที่ 3 อิฐก่อรูปแบบปริซึม (Masonry prism)

ตารางที่ 1 ขนาดของอิฐทดแทนที่ใช้ในงานทดสอบ

ประเภท	รูปแบบ	ขนาด		
		กว้าง (ซม.)	ยาว (ซม.)	สูง (ซม.)
อิฐก้อนเดี่ยว	ลูกบาศก์	4	4	4
		5	5	5
		8	8	8
	เต็มแผ่นตามแนวราบ	15	30	4
		15	30	5
		15	30	8
อิฐก่อ	ปริซึม	15	30	30

ตารางที่ 2 สมบัติต่าง ๆ ของอิฐโบราณ

ตัวอย่าง	ความหนาแน่น (ก./ซม. ³)	ความพรุน (%)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)
วัดไชยวัฒนาราม	1.63	31.30	22.80
วัดพระศรีสรรเพชญ์	1.78	29.70	37.00
วัดศาลापูน	1.51	33.10	27.50
พระราชวังโบราณ	1.86	31.90	22.00
วัดภูเขาทอง	-	-	-
เวียงนครเกษม	1.47	34.90	35.40
วัดราชบพิตร	1.40	34.30	25.10
วัดท่าตอ	1.64	32.10	30.80
วัดกระเจี	1.56	32.80	67.20
เฉลี่ย	1.61	32.51	33.48

ตารางที่ 3 จำนวนตัวอย่างทดสอบของอิฐทดแทนแต่ละรูปแบบ

ประเภท	รูปแบบ	ขนาด (ซม.)	การทดสอบ	
			กำลังรับแรงอัด (ตัวอย่าง)	กำลังรับแรงดัด (ตัวอย่าง)
อิฐก้อนเดี่ยว	ลูกบาศก์	4x4x4	5	-
		5x5x5	5	-
		8x8x8	5	-
	เต็มแผ่นตามแนวราบ	15x30x4	5	-
		15x30x5	5	5
		15x30x8	5	-
อิฐก่อ	ปริซึม	15x30x30	1	-

3. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การศึกษานี้ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของอิฐทดแทนซึ่งผ่านกระบวนการผลิตด้วยวิธีการแบบโบราณที่ใช้สำหรับการอนุรักษ์โบราณสถาน โดยรายละเอียดของกระบวนการทดสอบในห้องปฏิบัติการแสดงได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

3.1 การทดสอบความหนาแน่น

การทดสอบหาความหนาแน่นและความพรุนของอิฐนั้นเริ่มต้นจากการนำตัวอย่างมาอบให้แห้ง โดยนำเข้าเตาอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักหลังอบทำให้ได้น้ำหนักหลังอบแห้ง จากนั้นนำไปแช่น้ำทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ทำการชั่ง

น้ำหนักหลังแช่น้ำจนอิ่มตัว ทำให้ได้น้ำหนักของตัวอย่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ แล้วนำอิฐที่อิ่มตัวซึ่งน้ำหนักในน้ำ ทำให้ได้น้ำหนักที่ชั่งในน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งสามารถหาความหนาแน่นและความพรุนของอิฐจากการคำนวณ โดยอ้างอิงวิธีการคำนวณจาก ASTM C642-13 [13] ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\rho_b = [W_{dry}/(W_{sat} - W_{in\ water})] \times \rho_w \quad (1)$$

$$\rho_d = W_{dry}/V_d \quad (2)$$

$$\text{ความพรุน} = [(W_{sat} - W_{dry})/(W_{sat} - W_{in\ water})] \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ

$$\rho_b = \text{ความหนาแน่นแห้งที่คำนวณปริมาตรจากการแทนที่น้ำ, ก./ซม.}^3$$

$$\rho_d = \text{ความหนาแน่นแห้งที่คำนวณปริมาตรจากขนาดตัวอย่าง, ก./ซม.}^3$$

$$W_{dry} = \text{น้ำหนักของอิฐหลังจากผ่านการอบ, ก.}$$

$$W_{in\ water} = \text{น้ำหนักของอิฐที่ชั่งในน้ำ, ก.}$$

$$W_{sat} = \text{น้ำหนักของอิฐหลังจากผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง, ก.}$$

$$V_d = \text{ปริมาตรที่ได้จากการวัดตัวอย่าง, ซม.}^3$$

$$\rho_w = \text{ความหนาแน่นของน้ำ, 1 ก./ซม.}^3$$

$$\text{ความพรุน} = \text{ปริมาณช่องว่างในอิฐ, \%}$$

3.2 การทดสอบกำลังรับแรงของอิฐก้อนเดียว

ในการทดสอบกำลังรับแรงของอิฐก้อนเดียวนั้นทำการทดสอบโดยแบ่งเป็น 3 ประเภทคือ กำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบ กำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบลูกบาศก์ และการทดสอบกำลังรับแรงดัดของอิฐเต็มแผ่น โดยรายละเอียดสำหรับการทดสอบแต่ละประเภทแสดงดังต่อไปนี้

3.2.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบ

ตัวอย่างที่นำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดทุกก้อนต้องผ่านการทดสอบหาค่าความหนาแน่น และความพรุนของอิฐมาก่อนทุกตัวอย่าง โดยหลังจากทำการทดสอบความหนาแน่น และความพรุนของอิฐเต็มแผ่นเรียบร้อยแล้ว จึงทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ใช้อัตราเร็วในการกด 5 มม./นาที โดยนำแผ่นเหล็กและแผ่นยางรองทั้งบนและล่างเพื่อทำการกระจายแรงให้ลงผิวอิฐอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 5 ทำการทดสอบจนกระทั่งอิฐถึงจุดวิบัติและทำการบันทึกผลการทดสอบ

3.2.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบลูกบาศก์

ในทำนองเดียวกันกับการทดสอบอิฐรูปแบบเต็มแผ่น ตัวอย่างทดสอบทุกตัวอย่างต้องผ่านการทดสอบหาค่าความหนาแน่น และความพรุนก่อน จากนั้นจึงทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดที่มีความละเอียดสูง ขั้นตอนการติดตั้งตัวอย่างทดสอบชิ้นแรกใช้แท่นรองรับรองด้านล่างเพื่อปรับสมดุลของตัวอย่างทดสอบ จากนั้นวางตัวอย่างทดสอบให้อยู่กึ่งกลางของแท่นรองรับ สุดท้ายใช้แผ่นเหล็กวางด้านบนเพื่อกระจายโหลดที่มาจากเครื่องทดสอบ และใช้อัตราเร็วในการกด 0.5 มม./นาที ดังแสดงในรูปที่ 6 ในกรณีกำลังรับแรงอัดของอิฐก้อนเดียวทั้ง 2 รูปแบบสามารถคำนวณกำลังรับแรงอัดได้ดังนี้

$$\text{กำลังรับแรงอัด} = F/A \quad (4)$$

เมื่อ

$$\text{กำลังรับแรงอัด} = \text{กำลังต้านทานแรงอัด, กก./ซม.}^2$$

$$F = \text{แรงสูงสุดที่กระทำกับตัวอย่าง, กก.}$$

$$A = \text{พื้นที่หน้าตัดที่รับแรง, ซม.}^2$$

3.2.3 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของอิฐ

การทดสอบกำลังรับแรงดัดของอิฐ โดยทดสอบกับอิฐรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบ ด้วยวิธีการ Center-point loading อ้างอิงตาม ASTM C293/C293M -16 [14] ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยเมื่อทราบค่าแรงกระทำสูงสุด ทำให้สามารถหาลังรับแรงดัดได้จากสมการต่อไปนี้

$$F_b = 3PL/2bd^2 \quad (5)$$

เมื่อ

$$F_b = \text{กำลังรับแรงดัดของอิฐ, กก./ซม.}^2$$

$$P = \text{แรงกระทำสูงสุด, กก.}$$

$$L = \text{ความยาวช่วงคาน, ซม.}$$

$$b = \text{ความกว้างเฉลี่ยของหน้าตัดบริเวณที่เกิดรอยแตก, ซม.}$$

$$d = \text{ความลึกเฉลี่ยของหน้าตัดบริเวณที่เกิดรอยแตก, ซม.}$$

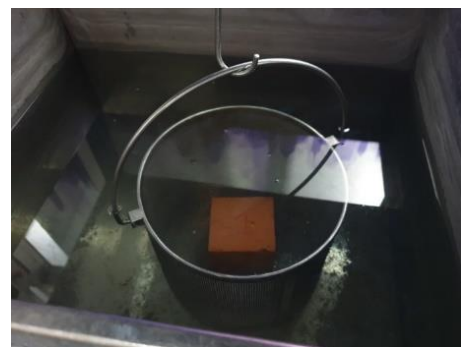
3.3 การทดสอบกำลังรับแรงของอิฐก่อ

3.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อ

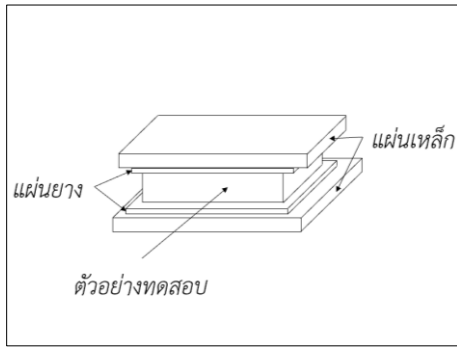
ทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ใช้อัตราเร็วในการกด 0.5 มม./นาที โดยนำแผ่นเหล็กและแผ่นยางรองทั้งบนและล่างเพื่อทำการกระจายแรงให้ลงผิวอิฐอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 8

การคำนวณกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อ ใช้สมการการคำนวณเช่นเดียวกันกับการคำนวณกำลังรับแรงอัดของอิฐก้อนเดียว ดังสมการที่ (4) แต่เนื่องจากความสูงของอิฐที่นำมาทดสอบมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อทำให้ต้องปรับแก้กำลังรับแรงอัดโดยคำนึงถึงอัตราส่วน h_p/t_p เพื่อให้ได้กำลังรับแรงอัดที่สอดคล้องตาม ASTM C1314 - 18 [15]

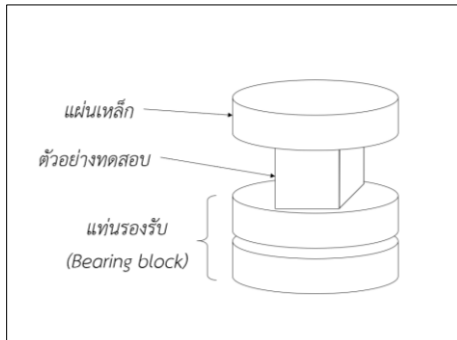
$$\text{โดย } h_p/t_p = \text{อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างด้านที่น้อยสุด}$$



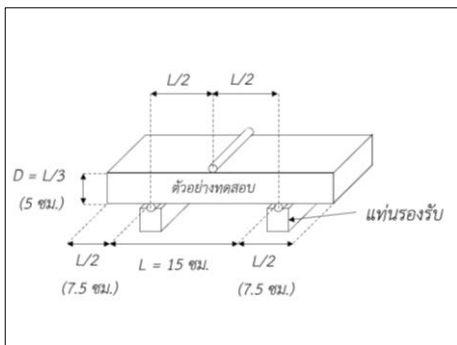
รูปที่ 4 การชั่งน้ำหนักในน้ำ



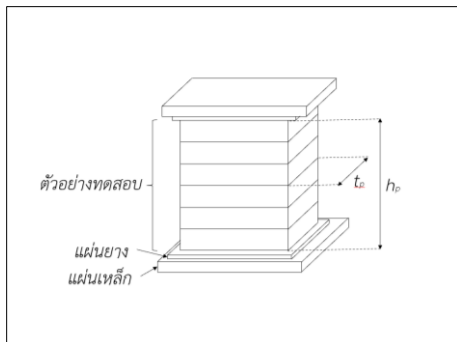
รูปที่ 5 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบเติมแผ่นตามแนวราบ



รูปที่ 6 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบลูกบาศก์



รูปที่ 7 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของอิฐ



รูปที่ 8 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบปริซึม

4. ผลการศึกษา

ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของอิฐทดแทน ทั้ง 2 ประเภท คืออิฐก้อนเดี่ยวและอิฐก่อ โดยอิฐก้อนเดี่ยวทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดรูปแบบลูกบาศก์ และรูปแบบเติมแผ่นตามแนวราบ ทดสอบกำลังรับแรงดัด ส่วนอิฐก่อทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดเพียงอย่างเดียว ท้ายสุดนำผลที่ได้จากการทดสอบมาหาความสัมพันธ์กันในรูปของสมการประมาณค่ากำลัง

4.1 ผลการทดสอบอิฐก้อนเดี่ยว

4.1.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบลูกบาศก์

จากตารางที่ 4 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบลูกบาศก์ ที่มีขนาดเท่ากับ 4x4x4 ซม. มีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 31.06 กก./ซม.² – 57.10 กก./ซม.² และอิฐที่มีขนาดเท่ากับ 5x5x5 ซม. มีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 46.41 กก./ซม.² – 70.59 กก./ซม.² ส่วนอิฐที่มีขนาดเท่ากับ 8x8x8 ซม. มีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 41.11 กก./ซม.² – 86.48 กก./ซม.² เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากอิฐโบราณในตารางที่ 2 พบว่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของอิฐโบราณขนาด 2x2x2 ซม. มีค่าเท่ากับ 33.48 กก./ซม.² โดยค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณและอิฐทดแทนมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เนื่องจากกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของอิฐโบราณขนาด 2x2x2 ซม. มีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของอิฐทดแทนขนาด 4x4x4 ซม. ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบคืออิฐรูปแบบลูกบาศก์ขนาดเล็กมีกำลังที่น้อยกว่าขนาดใหญ่

ความหนาแน่นแห้งที่คำนวณปริมาตรจากขนาดตัวอย่างของอิฐรูปแบบลูกบาศก์ที่มีขนาดเท่ากับ 4x4x4 ซม. มีค่าอยู่ในช่วง 1.28 ก./ซม.³ – 1.57 ก./ซม.³ และอิฐที่มีขนาดเท่ากับ 5x5x5 ซม. มีค่าอยู่ในช่วง 1.39 ก./ซม.³ – 1.59 ก./ซม.³ ส่วนอิฐที่มีขนาดเท่ากับ 8x8x8 ซม. มีค่าอยู่ในช่วง 1.33 ก./ซม.³ – 1.56 ก./ซม.³

ความหนาแน่นแห้งที่คำนวณปริมาตรจากการแทนที่น้ำของอิฐรูปแบบลูกบาศก์ที่มีขนาดเท่ากับ 4x4x4 ซม. มีค่าอยู่ในช่วง 1.61 ก./ซม.³ – 1.61 ก./ซม.³ และอิฐที่มีขนาดเท่ากับ 5x5x5 ซม. มีค่าอยู่ในช่วง 1.55 ก./ซม.³ – 1.58 ก./ซม.³ ส่วนอิฐที่มีขนาดเท่ากับ 8x8x8 ซม. มีค่าอยู่ในช่วง 1.57 ก./ซม.³ – 1.58 ก./ซม.³ เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากอิฐโบราณในตารางที่ 2 พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งที่คำนวณปริมาตรจากการแทนที่น้ำของอิฐโบราณมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.61 ก./ซม.³ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอิฐทดแทน

ความพรุนของอิฐรูปแบบลูกบาศก์ที่มีขนาดเท่ากับ 4x4x4 ซม. มีค่าอยู่ในช่วง 32.89 % – 34.08 % และอิฐที่มีขนาดเท่ากับ 5x5x5 ซม. มีค่าอยู่ในช่วง 33.60 % – 34.46 % ส่วนอิฐที่มีขนาดเท่ากับ 8x8x8 ซม. มีค่าอยู่ในช่วง 32.85 % – 33.58 % เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากอิฐโบราณในตารางที่ 2 พบว่าความพรุนของอิฐโบราณมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 32.51 % ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอิฐทดแทน

4.1.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบ
เต็มแผ่นตามแนวราบ

จากตารางที่ 5 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบเต็มแผ่นตาม
แนวราบที่มีขนาดเท่ากับ 15x30x4 ซม. มีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง
136.80 กก./ซม.² – 145.23 กก./ซม.² และอิฐที่มีขนาดเท่ากับ 15x30x5 ซม.
มีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 151.52 กก./ซม.² – 166.83 กก./ซม.²
ส่วนอิฐที่มีขนาดเท่ากับ 15x30x8 ซม. มีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง
74.80 กก./ซม.² – 110.72 กก./ซม.² เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัด
ของอิฐรูปแบบลูกบาศก์ พบว่า กำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบเต็มแผ่นตาม
แนวราบมีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่า

ความหนาแน่นแห้งที่คำนวณปริมาตรจากขนาดตัวอย่างของอิฐ
รูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบที่มีขนาดเท่ากับ 15x30x4 ซม. มีค่าอยู่ในช่วง
1.49 ก./ซม.³ – 1.63 ก./ซม.³ และอิฐที่มีขนาดเท่ากับ 15x30x5 ซม. มีค่าอยู่
ในช่วง 1.49 ก./ซม.³ – 1.57 ก./ซม.³ ส่วนอิฐที่มีขนาดเท่ากับ 15x30x8 ซม.
มีค่าอยู่ในช่วง 1.46 ก./ซม.³ – 1.53 ก./ซม.³ เมื่อเปรียบเทียบกับความ
หนาแน่นแห้งที่คำนวณปริมาตรจากขนาดตัวอย่างของอิฐรูปแบบลูกบาศก์
พบว่า ความหนาแน่นแห้งที่คำนวณปริมาตรจากขนาดตัวอย่างของอิฐรูปแบบ
เต็มแผ่นตามแนวราบมีช่วงที่แคบกว่าและมีค่าที่มากกว่าเล็กน้อย

ความหนาแน่นแห้งที่คำนวณปริมาตรจากการแทนที่น้ำของอิฐ
รูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบที่มีขนาดเท่ากับ 15x30x4 ซม. มีค่าอยู่ในช่วง
1.57 ก./ซม.³ – 1.62 ก./ซม.³ และอิฐที่มีขนาดเท่ากับ 15x30x5 ซม. มีค่าอยู่
ในช่วง 1.57 ก./ซม.³ – 1.62 ก./ซม.³ ส่วนอิฐที่มีขนาดเท่ากับ 15x30x8 ซม.
มีค่าอยู่ในช่วง 1.55 ก./ซม.³ – 1.63 ก./ซม.³ เมื่อเปรียบเทียบกับความ
หนาแน่นแห้งที่คำนวณปริมาตรจากการแทนที่น้ำของอิฐรูปแบบลูกบาศก์
พบว่า ทั้ง 2 รูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน

ความพรุนของอิฐรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบที่มีขนาดเท่ากับ
15x30x4 ซม. มีค่าอยู่ในช่วง 32.69 % – 34.02 % และอิฐที่มีขนาดเท่ากับ
15x30x5 ซม. มีค่าอยู่ในช่วง 30.15 % – 35.14 % ส่วนอิฐที่มีขนาดเท่ากับ
15x30x8 ซม. มีค่าอยู่ในช่วง 30.91 % – 35.03 % เมื่อเปรียบเทียบกับความ
พรุนของอิฐรูปแบบลูกบาศก์ พบว่าทั้ง 2 รูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน

จากผลการทดสอบของอิฐทั้ง 2 รูปแบบ พบว่าเมื่อค่าความหนาแน่น
แห้งที่คำนวณปริมาตรจากขนาดตัวอย่างสูงขึ้น กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มสูง
ขึ้น แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของอิฐมีความสัมพันธ์
กันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่าความพรุนมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นแห้ง
ที่คำนวณปริมาตรจากการแทนที่น้ำโดยเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นค่าความ
พรุนมีแนวโน้มลดลง

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบของอิฐรูปแบบลูกบาศก์แต่ละขนาด

ขนาด (ซม.)	ตัวอย่าง	ρ_d (ก./ซม. ³)	ρ_b (ก./ซม. ³)	ความพรุน (%)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)
4x4x4	1	1.28	1.61	33.87	38.77
	2	1.36	1.61	33.12	57.1
	3	1.41	1.61	33.94	45.58
	4	1.57	1.61	34.08	31.06
	5	1.44	1.61	32.89	47.69
	เฉลี่ย	1.41	1.61	33.58	44.04
5x5x5	1	1.39	1.57	34.45	56.48
	2	1.52	1.57	34.21	65.24
	3	1.54	1.58	33.60	46.41
	4	1.50	1.55	34.46	59.83
	5	1.59	1.58	34.12	70.59
	เฉลี่ย	1.51	1.57	34.17	59.71
8x8x8	1	1.56	1.57	32.85	86.48
	2	1.33	1.58	33.58	41.11
	3	1.50	1.58	33.37	67.36
	4	1.47	1.57	33.49	65.89
	5	1.53	1.58	33.23	78.53
	เฉลี่ย	1.48	1.58	33.30	67.87

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบของอิฐรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบแต่ละขนาด

ขนาด (ซม.)	ตัวอย่าง	ρ_d (ก./ซม. ³)	ρ_b (ก./ซม. ³)	ความพรุน (%)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)
15x30x4	1	1.59	1.58	33.77	142.96
	2	1.49	1.60	32.79	144.7
	3	1.56	1.59	33.34	145.23
	4	1.49	1.62	32.69	145.18
	5	1.63	1.57	34.02	136.8
	เฉลี่ย	1.55	1.59	33.32	142.97
15x30x5	1	1.54	1.61	33.11	162.04
	2	1.50	1.59	35.14	156.21
	3	1.53	1.62	33.25	158.54
	4	1.49	1.60	30.15	151.52
	5	1.57	1.57	33.88	166.83
	เฉลี่ย	1.53	1.60	33.11	159.03
15x30x8	1	1.46	1.59	30.91	74.80
	2	1.49	1.55	33.39	102.61
	3	1.50	1.60	33.90	110.72
	4	1.53	1.58	34.50	106.35
	5	1.46	1.63	35.03	109.73
	เฉลี่ย	1.49	1.59	33.55	100.84

4.1.3 การสร้างสมการประมาณค่ากำลังรับแรงอัด

จากผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นมีความสัมพันธ์กันแบบมีนัยสำคัญ จึงทำให้สามารถใช้ความสัมพันธ์เพื่อหาสมการประมาณค่ากำลังรับแรงอัดจากความหนาแน่นได้ เหตุผลที่ต้องการสมการประมาณค่ากำลังรับแรงอัดจากความหนาแน่น เป็นเพราะ การทดสอบกำลังรับแรงอัดมีความยุ่งยาก ซึ่งความหนาแน่นเป็นผลที่ได้สะดวกกว่าและใช้เวลาไม่นาน หรือกรณีที่ได้รับอิฐที่รูปร่างไม่สมบูรณ์มาเพียงแค่นำไปตัดเป็นทรงลูกบาศก์จากนั้นหาความหนาแน่นแล้วใช้สมการประมาณค่ากำลังรับแรงอัดก็ทำให้สามารถประเมินค่ากำลังรับแรงอัดโดยประมาณได้ ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงนำผลทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับค่ากำลังรับแรงอัด

การสร้างสมการประมาณค่ากำลังรับแรงอัดขั้นแรกหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอิฐกับค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของอิฐประเภทอิฐก้อนเดี่ยว ทั้ง 2 รูปแบบ ตามที่แสดงในรูปที่ 9 ซึ่งจากรูปที่ 9 พบว่าเมื่อขนาดอิฐเพิ่มขึ้น อิฐรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง ส่วนอิฐรูปแบบลูกบาศก์กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มสูงขึ้น ที่แนวโน้มต่างกันเป็นเพราะ อิฐรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบเมื่อมีขนาดความหนาเพิ่มขึ้น อัตราส่วนความขรุขระก็มากขึ้นด้วย ส่งผลให้ตัวอย่างที่มีความหนาแน่นน้อยมีแนวโน้มรับแรงได้มากกว่าตัวอย่างที่มีความหนาแน่นมาก [16] ซึ่งสามารถหาสมการประมาณค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐที่มีขนาดความหนาต่างกันจากรูปที่ 9 ได้ดังนี้

$$f_b = -12.58(b) + 205.54 \quad (6)$$

$$f_c = 5.21(b) + 27.67 \quad (7)$$

โดย

$$f_b = \text{กำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบ, กก./ซม.}^2$$

$$f_c = \text{กำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบลูกบาศก์, กก./ซม.}^2$$

b = ความหนาหรือขนาดลูกบาศก์ของอิฐ, ซม.

ในกรณีพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐนั้น อาศัยกรณีศึกษาจากตัวอย่างอิฐขนาดความหนา 5 ซม. โดยความหนาแน่นที่ใช้ในการสร้างสมการความสัมพันธ์ใช้ความหนาแน่นแห้งที่คำนวณปริมาตรจากการวัดขนาดของตัวอย่าง เนื่องจากความหนาแน่นที่คำนวณโดยวิธีการนี้สามารถประเมินได้ง่ายกว่าค่าความหนาแน่นที่คำนวณจากปริมาตรที่แท้จริงอันเกิดจากการแทนที่น้ำ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐทั้ง 2 รูปแบบ แสดงได้ดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11 โดยรูปที่ 10 ไม่คิดผลของตัวอย่างที่ 3 เนื่องจากกำลังรับแรงอัดมีค่าความคลาดเคลื่อนเกินร้อยละ 20 ของค่าเฉลี่ยทั้ง 5 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่ 3 มีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าตัวอย่างอื่นอาจเป็นเพราะตัวอย่างทดสอบอาจผ่านกระบวนการผลิตที่ไม่สมบูรณ์

จากรูปที่ 10 และรูปที่ 11 พบว่าเมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้น และทำให้สามารถหาสมการประมาณค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐขนาด 5 ซม. ที่มีความหนาแน่นต่างกันได้ดังนี้

$$f_b = 176.46(d) - 110.25 \quad (8)$$

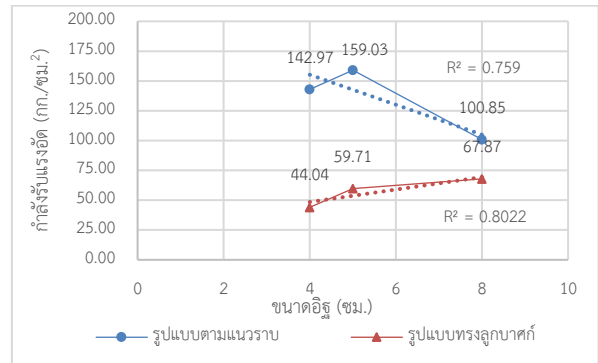
$$f_c = 70.15(d) - 42.20 \quad (9)$$

โดย

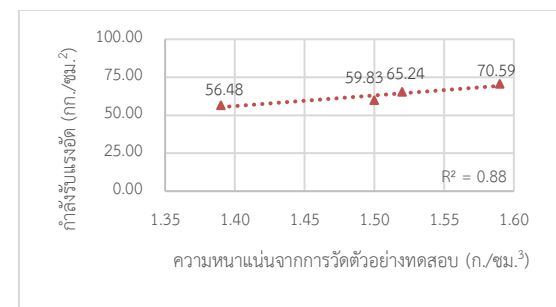
$$f_b = \text{กำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบ, กก./ซม.}^2$$

$$f_c = \text{กำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบลูกบาศก์, กก./ซม.}^2$$

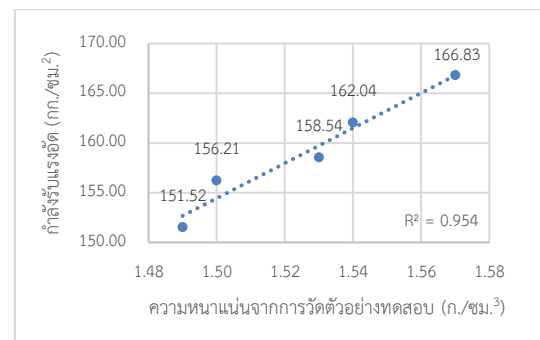
d = ความหนาแน่นของอิฐ, ซม.



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของอิฐกับค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของอิฐทั้ง 2 รูปแบบ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับค่ากำลังรับแรงอัดรูปแบบลูกบาศก์ของอิฐขนาด 5 ซม.



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับค่ากำลังรับแรงอัดรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบของอิฐขนาดความหนา 5 ซม.

สมการที่ 8 และ 9 สามารถใช้ประเมินค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐได้จากค่าความหนาแน่น โดยความคลาดเคลื่อนของการประมาณด้วยสมการเทียบกับผลการทดสอบจริงเป็นไปตามตารางที่ 6 และตารางที่ 7 ซึ่งในกรณีที่อิฐมีความหนาไม่เท่ากับ 5 ซม. สามารถดำเนินการประเมินหาสมการได้ในลักษณะเดียวกัน

จากตารางที่ 6 พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังรับแรงอัดที่ได้จากสมการประมาณค่าอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 1-6 ยกเว้นผลของตัวอย่างที่ 3 ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนมาก เนื่องจากเป็นตัวอย่างที่มีค่ากำลังรับแรงอัดจากการทดสอบต่ำกว่าค่าเฉลี่ยอย่างมาก อย่างไรก็ตามผลการทดสอบสำหรับตัวอย่างที่ 3 นี้ยังคงต้องบันทึกไว้เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการประเมินร่วมกับตัวอย่างอื่นที่อาจมีผลการทดสอบเพิ่มเติมในอนาคต

จากตารางที่ 7 พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนโดยประมาณมีค่าไม่เกินร้อยละ 1.13

จากการเปรียบเทียบผลการประมาณค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐด้วยสมการที่พัฒนาขึ้น พบว่าค่าที่ได้จากการใช้สมการประมาณค่ากำลังรับแรงอัดทั้ง 2 รูปแบบสามารถประเมินกำลังรับแรงอัดได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับผลทดสอบ ดังนั้นในกรณีที่สามารถรวบรวมข้อมูลวัสดุโบราณสถานที่แตกต่างกันในแต่ละที่มาทำการศึกษาในลักษณะเดียวกันนี้เพิ่มเติม ย่อมทำให้ฐานข้อมูลและการคาดการณ์กำลังของวัสดุมีความใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้นตามจำนวนตัวอย่างที่สามารถดำเนินการเพิ่มเติมได้ต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบลูกบาศก์

ขนาด (ซม.)	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)	กำลังรับแรงอัดที่ได้จากการใช้สมการประมาณค่ากำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)	ความคลาดเคลื่อน (%)
5x5x5	1	56.48	55.31	2.07
	2	65.24	64.43	1.24
	3	46.41	65.83	41.85
	4	59.83	63.03	5.34
	5	70.59	69.34	1.77

ตารางที่ 7 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบเติมแผ่นตามแนวราบ

ขนาด (ซม.)	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)	กำลังรับแรงอัดที่ได้จากการใช้สมการประมาณค่ากำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)	ความคลาดเคลื่อน (%)
15x30x5	1	162.04	161.50	0.33
	2	156.21	154.44	1.13
	3	158.54	159.73	0.75
	4	151.52	152.68	0.76
	5	166.83	166.79	0.02

4.1.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐ

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐใช้อิฐเติมแผ่นตามแนวราบที่มีขนาด 15x30x5 ซม. เพราะเป็นขนาดมาตรฐานของอิฐทดแทน จากนั้นนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดของอิฐเติมแผ่นที่มีขนาดเดียวกัน โดยผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐขนาด 15x30x5 ซม. แสดงได้ดังตารางที่ 8 จากตารางที่ 5 และตารางที่ 8 ทำให้ทราบค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยและกำลังรับแรงอัดของอิฐขนาดความหนา 5 ซม. พบว่ากำลังรับแรงอัดของอิฐมีค่าประมาณร้อยละ 6 ของกำลังรับแรงอัดของอิฐประเภทก้อนเดี่ยวรูปแบบเติมแผ่นตามแนวราบ ทำให้หาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงอัดอิฐ ได้ตามสมการที่ (10)

$$F_b = 0.06f_b \quad (10)$$

$$F_b = \text{กำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบเติมแผ่นตามแนวราบ, กก./ซม.}^2$$

$$f_b = \text{กำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบเติมแผ่นตามแนวราบ, กก./ซม.}^2$$

4.2 ผลการทดสอบอิฐก่อ

จากการทดสอบทำให้ได้ผลของแรงกระทำสูงสุด อัตราส่วน h_p/t_p และกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อรูปแบบปริซึม ดังแสดงในตารางที่ 9 ในการทดสอบนี้ใช้อิฐก่อเพียงแค่ 1 ตัวอย่าง ซึ่งคลาดเคลื่อนจากแผนการทดสอบเดิม อันเป็นเพราะผลกระทบของโรคระบาดโควิด-19 ทำให้การทดสอบได้รับการยกเลิก ทั้งนี้ผลการทดสอบที่ได้ 1 ตัวอย่างนี้สามารถอธิบายแนวทางในการประเมินกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อได้ดังต่อไปนี้

เมื่อได้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของอิฐขนาด 5 ซม. ของอิฐทั้ง 3 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 4 ตารางที่ 5 และตารางที่ 9 ทำให้หาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดอิฐก่อรูปแบบปริซึม และกำลังรับแรงอัดอิฐก่อก้อนเดี่ยวทั้ง 2 รูปแบบได้ดังนี้

สำหรับกรณีที่ใช้อิฐก่อรูปแบบเติมแผ่นตามแนวราบพบว่ากำลังรับแรงอัดของอิฐก่อมีค่าประมาณร้อยละ 11 ของกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อก้อนเดี่ยวรูปแบบเติมแผ่นตามแนวราบ ทำให้ได้สมการประมาณผลกำลังโดยประมาณดังนี้

$$f_m = 0.11f_b \quad (11)$$

$$f_m = \text{กำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบปริซึม, กก./ซม.}^2$$

$$f_b = \text{กำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบเติมแผ่นตามแนวราบ, กก./ซม.}^2$$

และสำหรับกรณีที่ใช้อิฐก่อรูปแบบลูกบาศก์พบว่ากำลังรับแรงอัดของอิฐก่อมีค่าประมาณร้อยละ 29 ของกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อก้อนเดี่ยวรูปแบบลูกบาศก์ ทำให้ได้สมการประมาณผลกำลังโดยประมาณดังนี้

$$f_m = 0.29f_c \quad (12)$$

$$f_m = \text{กำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบปริซึม, กก./ซม.}^2$$

$$f_c = \text{กำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบลูกบาศก์, กก./ซม.}^2$$

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของอิฐขนาด 15x30x5 ซม.

ตัวอย่าง	b (ซม.)	d (ซม.)	L (ซม.)	P (กก.)	F_b (กก./ซม. ²)
1	14.5	3.6	15	58.30	6.98
2	15	3.4	15	77.09	10.00
3	14.9	3.5	15	121.19	14.94
4	15.1	3.3	15	60.45	8.27
5	14.9	3.3	15	56.21	7.79
				เฉลี่ย	9.60

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบปริซึม

ตัวอย่าง	แรงกระทำสูงสุด (กก.)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)	อัตราส่วน h_p/t_p	ค่าปรับแก้ h_p/t_p	กำลังรับแรงอัดหลังปรับแก้ (กก./ซม. ²)
1	8660.49	18.7025	1.6578	0.92	17.21

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางกลของอิฐทดแทนโดยพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดตลอดจนความหนาแน่นที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐทดแทนและทำการเปรียบเทียบผลกับรายงานผลการทดสอบอิฐโบราณ นอกจากนี้ยังประเมินค่ากำลังรับแรงดัดของอิฐรวมถึงกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อนในกรณีที่ไม่ใช้ปูนสอ ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาเป็นประเด็นได้ดังนี้

1. สมบัติทางกลของอิฐทดแทนและอิฐโบราณมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

2. กำลังรับแรงอัดของอิฐทดแทนรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบมีค่าสูงกว่ารูปแบบลูกบาศก์ อิฐรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มต่ำลงเมื่อความหนาแน่นมากขึ้น ส่วนอิฐรูปแบบลูกบาศก์กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความหนาแน่นมากขึ้น และอิฐก้อนเดี่ยวทั้ง 2 รูปแบบ เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้น กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มสูงขึ้น

3. กำลังรับแรงอัดมีความสัมพันธ์กับขนาดและความหนาแน่น ทำให้สามารถประมาณค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐทดแทนประเภทอิฐก้อนเดี่ยวที่ขนาดและความหนาแน่นแตกต่างกันได้

4. กำลังรับแรงดัดของอิฐมีค่าประมาณร้อยละ 6 ของกำลังรับแรงอัดของอิฐก้อนเดี่ยว กำลังรับแรงอัดของอิฐก่อรูปแบบปริซึมมีค่าประมาณร้อยละ 11 ของกำลังรับแรงอัดของอิฐก้อนเดี่ยวรูปแบบเต็มแผ่นตามแนวราบ และร้อยละ 29 สำหรับกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อเดี่ยวรูปแบบลูกบาศก์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และได้รับการสนับสนุนวัสดุทดสอบจากอุทยานประวัติศาสตร์พระนครคีรีอยุธยา

เอกสารอ้างอิง

- [1] นวลลักษณ์ วิสสันตชาติ (2561). หน้าจั่ว: ว่าด้วยสถาปัตยกรรม การออกแบบ และสภาพแวดล้อม. *วารสารวิชาการ ประจำคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร*, ฉบับที่ 33, หน้า 45-46
- [2] ขวัญเนตร อินทร์จักร (2560). *พฤติกรรมกรรทงเที่ยวอุทยานประวัติศาสตร์พระนครคีรีอยุธยาของนักท่องเที่ยวเกาหลีใต้*. ภาควิชา รัฐศาสตร์และรัฐประศาสนศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 28-39
- [3] Zheng, S., Niu, L., Pei, P. and Dong, J. (2019). Mechanical Behavior of Brick Masonry in an Acidic Atmospheric Environment. *Materials* 2019, 12, 2694, pp. 1-24
- [4] Tang, Y., Shao, Z. and Xu, T. (2018). Uniaxial compressive tests on ancient brick masonry from heritage buildings under unsaturated freeze- thaw conditions. *Construction and Building Materials*, 183, pp. 706–715
- [5] Kumavat, H.R. (2016). An Experimental Investigation of Mechanical Properties in Clay Brick Masonry by Partial Replacement of Fine Aggregate with Clay Brick Waste. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, volume 97 , pp. 199-204
- [6] Mitikie, B.B., Lee, T.S. and Chang, B.C. (2018). Application of Enzyme to Clay Brick and its Effect on Mechanical Properties. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(7) , pp. 2528-2537
- [7] Domède, N., Pons, G., Sellier, A. and Fritih, Y. (2009). Mechanical behaviour of ancient masonry. *Materials and Structures*, 42, pp. 123–133
- [8] Silveira, D., Varum, H., Costa, A., Martins, T., Pereira, H. and Almeida, J. (2012). Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions. *Construction and Building Materials*, 28, pp. 36–44
- [9] สุดชาย พานสุวรรณ (2543). *การวิเคราะห์โบราณสถานก่ออิฐในเชิงวิศวกรรม*. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 15-31
- [10] สุทัศน์ สีสาทวิวัฒน์, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัยณรงค์ อธิสกุล, รักติพงษ์ สหมิตรมงคล และ เสน่ห์ มหาผล (2562). *โครงการพัฒนาฐานข้อมูลทางวิศวกรรมเพื่อการประเมินและติดตามสภาพโครงสร้างโบราณสถานของไทย*. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), หน้า 111– 141
- [11] จาตุรันต์ แร่เพชร, ธนสร อาจสำอางค์ และ พันธิพานาคนวน (2560). *การศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างอิฐโบราณ: คุณสมบัติเชิงกลภายใต้แรงอัดการทดสอบแบบไม่ทำลาย และการสะสมของเกลือ*. ภาควิชา

วิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,
หน้า 30-61

- [12] Sereenonchai, D. and Pratomsiripaisan, W. (2016). *Properties of Masonry bricks and Lime mortar for Restoration of Historic Structures*. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 35-47
- [13] ASTM C642, 2013. *Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA,
- [14] ASTM C293/C293M, 2016. *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [15] ASTM C1314, 2018. *Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [16] ปริญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุศรีพิทักษ์กุล (2556). *ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต*. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, หน้า 199-200