สมบัติทางกลของอิฐโบราณและกำลังอัดของก่ออิฐทดแทนเพื่อการอนุรักษ์โบราณสถาน

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

ชวัลวิท พาเจริญ[1,*], พีรสิภ ทาชัย[2], กิตตินันท์ ดวงภักดี[3], ณวสี จุรีวรรณ[4] และ ชวิศ วัชโรทัย[5]
[1,2,3,4,5,6] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ โรงเรียนเตรียมวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
*Corresponding author; E-mail address: Chawanvit.phaa@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำสมบัติโบราณจากโบราณสถานในเชียงแสน โดยได้ทำการทดสอบห้องปฏิบัติการได้แก่ กำลังรับแรงอัดความหนาแทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐในรูปแบบลูกบาศก์ และทดสอบอิฐกซึ่งมีแบบแม่พิมพ์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าค่าดหมายทุกนี้โดยตัวอย่างกรมศิลปากรตัวอย่างอิฐโบราณในการทดสอบของกรมศิลปากรสำหรับใช้ในงานเชิงอนุรักษ์โบราณประสานที่จะใช้ผสมน้ำในอัตราส่วนปูนหมัก และ1:8:24 ตามปริมาตรในการทดสอบกำลังอัดของก่ออิฐทดแทนในการทดสอบกำลังอัดของก่ออิฐทดแทนในการทดสอบกำลังอัดของก่ออิฐทดแทน

ศึกษาคุณสมบัติของปูนก่อและปูนฉาบที่เหมาะสมสำหรับโบราณสถานนั้นๆ

สุดชาย[2] ได้ทำการสำรวจวิจัยเกี่ยวกับการรับแรงของอิฐโบราณจากโบราณสถานต่างๆ ในจังหวัดสุโขทัย ศรีสัชนาลัย และกำแพงเพชร ซึ่งอิฐโบราณที่นำมาทดสอบนั้นได้สุ่มเก็บตัวอย่างมาจากโบราณสถานแต่ละแห่งในบริเวณดังกล่าว ซึ่งอิฐโบราณที่นำมาทดสอบนั้นได้สุ่มเก็บตัวอย่างมาจากโบราณสถานแต่ละแห่งในบริเวณดังกล่าว ซึ่งอิฐโบราณที่นำมาทดสอบนั้นได้สุ่มเก็บตัวอย่างมาจากโบราณสถานแต่ละแห่งในบริเวณดังกล่าว

สุทัศ[3] ได้ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุโบราณในโบราณสถานวัดโสมนัสวิหาร จังหวัดสุโขทัย ซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่างมาจาก

2.1.4 ปูนก่อทดแทน (Substitution Mortars)

ปูนก่อที่ใช้ในงานโดยทั่วไปคือปูนซีเมนต์ผสมทรายอัตราส่วน 1:3 โดยปริมาตร ตามมาตรฐาน ASTM C270-19 [7] ซึ่งจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีจำนวนมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้ปูนก่อทดแทนที่มีอัตราส่วนผสมเป็นปูนซีเมนต์ผสมทรายอัตราส่วน 1:8 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ใช้ในการก่อผนังอิฐมอญในปัจจุบัน เพื่อใช้ในการก่อตัวอย่างทดสอบ [1,3,6] บูรณะซ่อมแซมอาคารโบราณ



2.2 การเตรียมตัวอย่างอิฐโบราณสำหรับการทดสอบ

เนื่องจากจำนวนตัวอย่างอิฐโบราณที่ได้จากการรื้อถอนอาคารมีจำนวนจำกัด ดังนั้นในการทดสอบกำลังอัดของอิฐโบราณในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้ตัวอย่างอิฐโบราณที่ได้จากการรื้อถอนอาคารโบราณเต็มแผ่นมาตัดและตกแต่งผิวหน้าของอิฐโบราณให้มีขนาดประมาณ 3 ซม. ด้วยใบเลื่อยตัดกระเบื้องแบบใช้น้ำเสมอกันทั้งก้อน เพื่อให้ตัวอย่างทดสอบมีความสามารถในการรับแรงอัดได้อย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 3 ตัวอย่างอิฐโบราณที่นำมาใช้ในการทดสอบ

3. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การศึกษานี้ทำการทดสอบสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของอิฐโบราณและอิฐทดแทนที่ใช้สำหรับงานอนุรักษ์อาคารโบราณแซมโดยมีรายละเอียดของกระบวนการทดสอบในห้องปฏิบัติการต่อไปนี้

3.1 การทดสอบความหนาแน่นและความพรุน

การทดสอบความหนาแน่นของอิฐโบราณนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบค่าความหนาแน่นของอิฐโบราณเพื่อใช้ในการทดสอบหาความหนาแน่นของอิฐทดแทนให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งสามารถหาได้ด้วยวิธีการหาความหนาแน่นของอิฐโบราณด้วยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ จะใช้หลักการของแรงลอยตัวเข้ามาเกี่ยวข้องในการหาปริมาตรของอิฐโบราณ ตัวอย่างทดสอบจำนวน 24 ชิ้น ถูกนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปชั่งน้ำหนักในสภาพอิ่มน้ำ (Saturated Surface Dry) และชั่งน้ำหนักในน้ำ จากนั้นนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาชั่งน้ำหนักในสภาพแห้ง (Oven Dry) ตามมาตรฐาน ASTM C642-13 [7] ซึ่งจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีจำนวนมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้ตัวอย่างทดสอบจำนวน 24 ชิ้น ถูกนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปชั่งน้ำหนักในสภาพอิ่มน้ำ (Saturated Surface Dry) และชั่งน้ำหนักในน้ำ จากนั้นนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาชั่งน้ำหนักในสภาพแห้ง (Oven Dry) ตามมาตรฐาน ASTM C642-13 [7] ซึ่งจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีจำนวนมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้ตัวอย่างทดสอบจำนวน 24 ชิ้น ถูกนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปชั่งน้ำหนักในสภาพอิ่มน้ำ (Saturated Surface Dry) และชั่งน้ำหนักในน้ำ จากนั้นนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาชั่งน้ำหนักในสภาพแห้ง (Oven Dry) ตามมาตรฐาน ASTM C642-13 [7]

3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐ

งานทดสอบนี้ได้ดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการวิจัยโครงสร้างรูปแบบลูกบาศก์ โดยตัวอย่างทดสอบมีขนาดหน้าแคบและความพรุนมากกว่าอิฐทดแทนที่มีการทดสอบเวรอิยมาจากการทดสองบตใหอยู่ในแผ่นเหล็กกว้างด้านบนของตัวเครื่องแทสดสองใบนรูป 5 ซม. ในการทดสอบ



รูปที่ 5 ตัวอย่างทดสอบบนเครื่องทดสอบ

3.3 การสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อทดแทน

ทำการทดสอบกำลังอัดของอิฐทดแทนด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine (UTM) ด้วยอัตราการให้แรงที่ 5 มม./นาที ซึ่งในการทดสอบหาความหนาแน่นของอิฐทดแทนนั้นจะใช้เครื่องวัดการหดตัวของคอนกรีต (Compressometer) ในการวัดระยะหดตัวของตัวอย่างทดสอบ โดยตัวอย่างทดสอบจะถูกติดตั้งแสตดโดยใช้ปูนที่มีส่วนผสมเดียวกันกับปูนก่อทดแทนที่ใช้ในการก่อตัวอย่างทดสอบ ซึ่งจะทำการทดสอบจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ เพื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐทดแทนที่ใช้ในการก่อตัวอย่างทดสอบ ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐทดแทนที่ได้จากการทดสอบนี้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบก่ออิฐในลำดับต่อไป

ชคี่ องอั ตราสว่ นคงตามมาตรฐาน ASTM C1314-18 [8]



รูปที่ 6 ชิ้นทดสอบสำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเค้นด้านข้างที่อยู่นิ่ง

3.4 การทดสอบค่าคงที่ยืดหยุ่น

การทดสอบหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของคอนกรีตพร้อมกับการทดสอบกำลังอัดใช้เครื่องวัดการหดตัวระยะยาว (Compressometer) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการหดตัวของคอนกรีตในแนวแกนของชิ้นทดสอบ ประกอบด้วยแท่งเหล็กสำหรับยึดติดกับชิ้นทดสอบ และเครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงระยะ (Linear Variable Differential) ที่เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) ที่ใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างแท่งเหล็กทั้งสองที่ยึดติดกับชิ้นทดสอบ ซึ่งมีความละเอียดในการวัดถึง 0.001 มิลลิเมตร ในการทดสอบจะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงระยะที่ความเค้นต่างๆ ในช่วงความเค้นที่ 0 ถึง 40% ของกำลังอัดประลัย ที่อายุ 28 วัน ของตัวอย่างทดสอบ โดยจะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงระยะที่ความเค้นประมาณ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40% ของกำลังอัดประลัย ที่อายุ 28 วัน ของตัวอย่างทดสอบ ในการวัดการเปลี่ยนแปลงระยะที่ความเค้นแต่ละค่านั้นจะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงระยะ 2 ครั้ง ที่ความเค้นเดียวกัน ในการทดสอบแต่ละครั้งจะใช้ตัวอย่างทดสอบ 2 ตัวอย่าง ในการทดสอบแต่ละครั้ง

จากตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างอิฐโบราณจากวัดพระธาตุ ในรูปแบบทรงกระบอกยาวเท่ากับ 30.13 เซนติเมตร ในชั่วงระหว่าง 49.36 กก./ซม.² และมีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่ 41.12 กก./ซม.² ขนาดของตัวอย่างมีความหนาเฉลี่ยที่ 3.62 ซม.

จากตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณจากวัดพระธาตุ เหลวในรูปแบบทรงกระบอกยาวเท่ากับ 30.96 ซม. ในช่วงระหว่าง 140.96 – 249.99 กก./ซม.² และมีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่ 208.70 กก./ซม.² ขนาดของตัวอย่างมีความหนาเฉลี่ยที่ 3.66 ซม.

จากตารางที่ 4 ผลการทดสอบอิฐโบราณจากวัดพระธาตุ ในรูปแบบทรงกระบอกยาวเท่ากับ 31.78 เซนติเมตร ในช่วงระหว่าง 54.74 – 60.71 กก./ซม.² และมีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่ 60.61 กก./ซม.² ขนาดของตัวอย่างมีความหนาเฉลี่ยที่ 3.61 ซม.

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณทั้งหมดในการศึกษาครั้งนี้ ค่าของกำลังรับแรงอัดของแต่ละตัวอย่างมีค่าแตกต่างกันอย่างมาก และพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณมีความแปรปรวนสูง [4] ในขณะที่ค่าความหนาแน่นของอิฐโบราณมีความแปรปรวนต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [5] ที่ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของอิฐโบราณจากวัดต่างๆ ในประเทศไทย ซึ่งพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณมีความแปรปรวนสูงมาก ในขณะที่ค่าความหนาแน่นมีความแปรปรวนต่ำ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นของอิฐโบราณ ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 10 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างอิฐโบราณกับค่าความหนาแน่นของอิฐโบราณ

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบอิฐโบราณจากวัดพระธาตุ

ตัวอย่าง	ρb (กก./ม.³)	ρd (กก./ม.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 ผลการทดสอบอิฐโบราณจากวัดพระธาตุ

ตัวอย่าง	ρb (กก./ม.³)	ρd (กก./ม.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	54.43
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 1 ผลการทดสอบอิฐโบราณจากวัดพระธาตุ

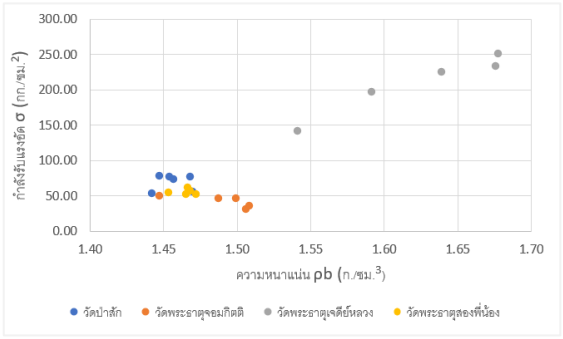
ตัวอย่าง	ρb (กก./ม.³)	ρd (กก./ม.³)	ความพรุน P (%)	กำลังรับแรงอัด σ (กก./ซม.²)
A1	1.47	1.34	37.12	54.67
A2	1.47	1.40	36.82	76.56
A3	1.44	1.36	38.41	52.27
A4	1.45	1.39	37.79	76.30
A5	1.46	1.40	37.91	72.27
A6	1.45	1.39	37.58	76.72
เฉลี่ย	1.46	1.38	37.60	68.13

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบอิฐโบราณจากวัดพระธาตุ

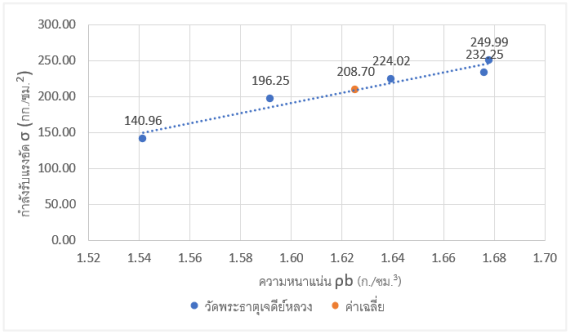
ตัวอย่าง	ρb (กก./ม.³)	ρd (กก./ม.³)	ความพรุน P (%)	กำลังรับแรงอัด σ (กก./ซม.²)
B1	1.51	1.40	39.45	49.36
B2	1.51	1.39	38.00	30.13
B3	1.50	1.37	38.85	35.44
B4	1.49	1.35	39.10	45.05
B5	1.52	1.40	38.21	45.61
เฉลี่ย	1.51	1.38	38.72	41.12

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบอิฐโบราณจากวัดพระธาตุและแหล่งโบราณสถานอื่นๆ ในประเทศไทย

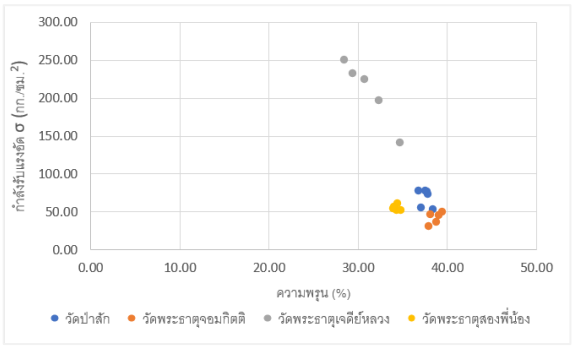
ตัวอย่าง	ρb (กก./ม.³)	ความพรุน P (%)	กำลังรับแรงอัด σ (กก./ซม.²)
วัดปู่และย่าตายาย	1.44	37.60	68.13
วัดพระธาตุ	1.51	38.72	41.12
วัดพระธาตุ	1.63	31.14	208.70
วัดพระธาตุ	1.47	34.33	54.74
วัดไชยวัฒนาราม	1.63	31.3	22.8
วัดพระศรีสรรเพชญ์	1.78	29.7	37
วัดศาลาลอย	1.51	33.1	27.5
พระราชวังโบราณ	1.86	31.9	22
เวียงกุมกาม	1.47	34.9	35.4
วัดราชบูรณะ	1.4	34.3	25.1
วัดท่าการ้อง	1.64	32.1	30.8
วัดกระโจมทอง	1.56	32.8	67.2
วัดบ้านเชียง	1.37	-	40.12
ภูเขาทอง	1.38	-	51.61
วัดขุนอินทประมูล	1.4	-	57.19
วัดพนัญเชิงวรวิหาร	1.38	-	39.54
วัดพระศรีสรรเพชญ์	1.46	-	37.58
วัดกุฎีดาว	1.46	-	44.01
วัดสมณโกฏฐาราม	1.48	-	50.12



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นกับกำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณในรูปแบบลูกบาศก์

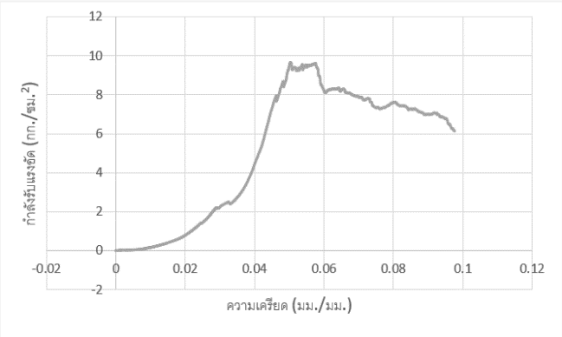


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นเฉลี่ยกับกำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณตัวอย่างอิฐโบราณในรูปแบบลูกบาศก์

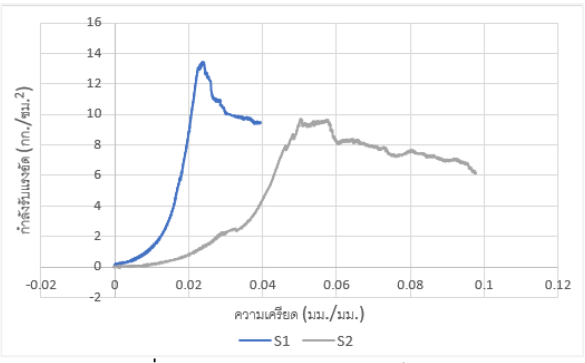


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ความพรุนและกำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณในรูปแบบลูกบาศก์

ปรับแก้ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐก่อทั้งชิ้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.67 กก./ซม.2 ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 1.23 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าในตารางที่ 1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอิฐก่อทั้งชิ้น



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง (S2) ความเค



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและกำลังรับแรงอัด (S1และS2)

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

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

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาครั้งนี้นำเสนอผลการทดสอบสมบัติทางกลของอิฐโบราณจากวัดพระธาตุ จังหวัดลำพูน และวัดสวนดอก จังหวัดเชียงใหม่ ในเขตภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งเป็นแหล่งอิฐโบราณที่สำคัญ ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณจากวัดพระธาตุ มีค่าอยู่ในช่วง 1.44 ถึง 1.47 กก./ซม.2 ส่วนอิฐโบราณจากวัดสวนดอก มีค่าอยู่ในช่วง 1.49 ถึง 1.52 กก./ซม.2 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอิฐโบราณจากวัดพระธาตุ ในขณะที่อิฐโบราณจากวัดศรีโคมคำ มีค่าอยู่ในช่วง 1.54 ถึง 1.68 กก./ซม.2 ซึ่งมีค่าสูงกว่าอิฐโบราณจากวัดพระธาตุและวัดสวนดอก ประมาณ 1.45 ถึง 1.47 เท่า ในขณะที่อิฐโบราณสถานของไทย [1] มีค่าอยู่ในช่วง 1.49 ถึง 1.52 กก./ซม.2 [3] ธาตุทุ่งศรีมงคล [4] ดอนมูล [5] ศรีวิชัย [6] ศรีเทพ [7] ศรีสัชนาลัย [8] ศรีสัชนาลัย [9] ศรีสัชนาลัย [10] ศรีสัชนาลัย [11] ศรีสัชนาลัย [12] ศรีสัชนาลัย [13] ศรีสัชนาลัย [14] ศรีสัชนาลัย [15] ศรีสัชนาลัย [16] ศรีสัชนาลัย [17] ศรีสัชนาลัย [18] ศรีสัชนาลัย [19] ศรีสัชนาลัย [20] ศรีสัชนาลัย [21] ศรีสัชนาลัย [22] ศรีสัชนาลัย [23] ศรีสัชนาลัย [24] ศรีสัชนาลัย [25] ศรีสัชนาลัย [26] ศรีสัชนาลัย

[4] สุนัย พีโรตสกิ ทรธิวิมิ์ ชมภูหา, ศาสุทุตวัศร้นร์งณชิ ัรยภั ทร ลีลาชทัวยีณวรัังฒคน์ อธิ สกุล (2563). สมบัติทางกลของเพื่ อการอนุรัมกาษิ์ชิ้บกรากรณีวิสศาวกณขรอมไทย. การประชุมโยธาแห่, 1ง-15ชาติ, ชลบุรี, สมาคมวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 5

[5] สุรพั, สศุนนิ์ ยุธชิ ัโปยตฤณศิริ, ครมีคิ ร์มชงอาคตลิ สตุ้ล้งจิ ร ภั, สทุรทั ศนพ์ีรลสีิลทาธร2564). วมัฒกนมสัุงหอรัณชั ย (และค่ าคงทีย่ ดอหทยดุแ่ ทนนขรอูงปอแิบฐบกอ่ โบราณ และอิฐก่ ปรชิ ซึม. การประชุ26, 23-25ชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ม ณ, รุ ะน, ชอ่ ยหนเทศไทย.

[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.