

## กำลังอัด และค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อโบราณ และอิฐก่อทดแทนรูปแบบปริซึม

### COMPRESSIVE STRENGTH AND ELASTIC CONSTANT OF THE ANCIENT AND SUBSTITUTION MASONRY PRISMS

สุรพัช นธิปฏิคม<sup>1,\*</sup>, สุนัย โตศิริมงคล<sup>1</sup>, ชัยณรงค์ อธิสกุล<sup>1</sup>, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร<sup>1</sup>, สุทัศน์ สีสาทวีวัฒน์<sup>1</sup> และ พีรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

\*Corresponding author address: suraphat.sf2@mail.kmutt.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการทดสอบอิฐก่อโบราณและอิฐก่อทดแทนรูปทรงปริซึมเพื่อหาลำดับกำลังอัด และค่าคงที่ยืดหยุ่น ตัวอย่างทดสอบและวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ได้รับการสนับสนุนจากกรมศิลปากร โดยตัวอย่างผลิตขึ้นตามแนวทางที่กรมศิลปากรแนะนำและข้อกำหนดที่ใช้ในโครงการอนุรักษ์วัดกระเจี ซึ่งอิฐก่อโบราณที่ใช้ในงานอนุรักษ์ได้จัดทำขึ้นในปี พ.ศ. 2562 สำหรับอิฐก่อจากวัสดุทดแทนจัดทำขึ้นสำหรับการทดสอบ 2 รูปแบบ ได้แก่ อิฐก่อที่ไม่ใช้วัสดุประสาน และอิฐก่อที่ใช้วัสดุประสานเป็นปูนหมักตามแนวทางส่วนผสมของกรมศิลปากร ซึ่งอิฐก่อที่นำมอดด้วยอิฐเต็มแผ่นตามแนวราบ ขนาด 15x30x5 ซม.<sup>3</sup> จำนวน 6 แผ่น ในรูปแบบปริซึมสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทั้งนี้การศึกษานี้ได้พัฒนาเครื่องมือวัดระยะการยุบตัวเพื่อใช้สำหรับการทดสอบหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อโดยเฉพาะ การศึกษานี้รายงานผลของค่ากำลังอัดและค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อโบราณรวมถึงอิฐก่อทดแทนรูปทรงปริซึม ผลการศึกษาพบว่าค่ากำลังอัดเฉลี่ยของอิฐก่อทดแทนในกรณีที่มีวัสดุประสานมีค่าเท่ากับ 19.4 กก./ซม.<sup>2</sup> ส่วนอิฐก่อทดแทนที่ไม่ใช้วัสดุประสานมีกำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 20.1 กก./ซม.<sup>2</sup> และสำหรับอิฐก่อโบราณซึ่งมีวัสดุประสานจะมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 25.2 กก./ซม.<sup>2</sup> จากผลการทดสอบพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของอิฐก่อมีลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้น การศึกษานี้เสนอแนวทางการประมาณเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในช่วงยืดหยุ่นให้เป็นเส้นตรง 2 ช่วงตามค่าคงที่ยืดหยุ่น 2 ค่าได้แก่ค่า E1 และ E2 โดยค่าคงที่ยืดหยุ่นค่าแรก E1 สำหรับอิฐก่อทดแทนจะมีค่าในช่วง 61.7-186.4 กก./ซม.<sup>2</sup> ส่วนกรณีอิฐก่อโบราณจะมีค่าคงที่ยืดหยุ่นค่าแรก E1 ประมาณ 110.2 กก./ซม.<sup>2</sup> สำหรับค่าคงที่ยืดหยุ่นค่าที่สอง E2 สำหรับอิฐก่อทดแทนจะมีค่าในช่วง 350.4-806.5 กก./ซม.<sup>2</sup> และในกรณีอิฐก่อโบราณค่าคงที่ยืดหยุ่นค่าที่สอง E2 จะมีค่าประมาณ 1467.7 กก./ซม.<sup>2</sup>

**คำสำคัญ:** กำลังอัด, ค่าคงที่ยืดหยุ่น, ปูนหมัก, อิฐก่อรูปแบบปริซึม, อิฐก่อโบราณ

#### Abstract

This paper presents the experimental method for compressive strength and elasticity modulus of the ancient and substitution masonry prisms. In this study, samples and materials were supported by the Department of Fine Arts prisms. According to the Department of Fine Art guidelines and the Wat Krachee conservation project requirements, the ancient prisms were created in 2019. The substitution masonry prisms were made into two categories. First is the stack prisms without the binder. Second is the stack prisms with binder made from the slaked lime putty as specified by the Department of Fine Art guidelines. The stack prisms composed of 6 flatwise bricks having the dimension of 15x30x5 cm<sup>3</sup>. A rectangular compressometer was developed and used to investigate the elasticity modulus. The compressive strength and elasticity modulus of the ancient and substitution masonry prisms are presented. The results show that the average compressive strength of substitution masonry stack prisms with and without the binder is 19.4 ksc and 20.1 ksc, respectively. In the ancient masonry prisms with the binder, the average compressive strength is 25.16 ksc. According to the experimental results, the stress-strain curve shows the nonlinear behavior of the masonry prisms material. This study introduces the simplified stress-strain curve of masonry prisms in an elastic range using the two linear curves with two elastic constants E1 and E2. The first elastic constant E1 for the substitution masonry prisms is in the range of 61.7-186.4 ksc, while the value for ancient masonry prism is around 110.2 ksc. The second elastic constant E2 for the substitution masonry prisms ranges from 350.4-806.5 ksc, while the value for ancient masonry prism is around 1467.7 ksc.

**Keywords:** Ancient masonry, compressive strength, elasticity modulus, lime putty, masonry prisms

## 1. บทนำ

โบราณสถานของไทยมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อประเทศไทย ทั้งในเรื่องของภาพลักษณ์ เศรษฐกิจการท่องเที่ยว และคุณค่าทางด้านประวัติศาสตร์มาอย่างยาวนาน และเมื่อเวลาผ่านไปการเสื่อมสภาพต่าง ๆ ของตัววัสดุหลักของโครงสร้างโบราณสถาน ที่ส่วนใหญ่ประกอบขึ้นจากอิฐได้เสื่อมสภาพไปด้วยปัจจัยทางสภาพแวดล้อมต่าง ๆ โดยตัวอย่างผลของความเสียหายนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 ถึง รูปที่ 3 ซึ่งในการบูรณะซ่อมแซมโบราณสถาน ยังต้องคำนึงถึงรายละเอียดของตัววัสดุที่จะนำมาใช้อย่างเหมาะสม เพื่อที่จะทำให้โบราณสถานสำคัญ ๆ ยังคงคุณค่าที่งดงามต่อไป แต่อย่างไรก็ตามในการที่จะบูรณะซ่อมแซมนั้นยังคงต้องมีการค้นคว้าวิจัยสมบัติ และพฤติกรรมของวัสดุอย่างต่อเนื่องเพื่อให้รู้และเข้าใจในพฤติกรรมธรรมชาติของวัสดุที่ใช้ในโบราณสถาน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติวัสดุโบราณของไทยมีตัวอย่างดังต่อไปนี้

นวลลักษณ์ วัสสันตชาติ [1] ได้ศึกษาสมบัติของปูนสอและปูนฉาบที่พบในโบราณสถานพระนครศรีอยุธยา ซึ่งมีการให้ความเห็นว่าโบราณสถานแต่ละแห่งมีสมบัติวัสดุที่แตกต่างกัน การจะบูรณะซ่อมแซมโบราณสถานแต่ละแห่งควรต้องตรวจสอบสมบัติของวัสดุตั้งเดิมก่อนแล้วใช้วัสดุทดแทนที่มีสมบัติใกล้เคียงกันในการบูรณะ การบูรณะด้วยวัสดุที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดปัญหาในด้านอื่นตามมาในระยะยาวได้

สุดชาย พานสุวรรณ [2] ได้ศึกษาถึงความสามารถในการรับแรงของอิฐโบราณจากแหล่งโบราณสถานในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา 8 แห่ง และอิฐทดแทนที่ใช้ในการบูรณะโบราณสถาน ซึ่งพบว่ากำลังรับแรงอัด และค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐตัวอย่างของแต่ละกลุ่มยังมีความแตกต่างกันอยู่มาก

สุนัย และคณะ [3] ได้ทำการทดสอบเพื่อหาสมบัติทางกลของอิฐทดแทนทำให้ทราบข้อมูล กำลังวัสดุ ความหนาแน่น และความพรุนของอิฐทดแทน

สุทัศน์ และคณะ [4] ได้ทำการทดสอบอิฐก่อที่ใช้วัสดุประสานที่มีความแตกต่างของแต่ละส่วนผสม พบว่ากำลังรับแรงอัดของอิฐก่อมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากกำลังอัดของอิฐก่อส่วนใหญ่เป็นผลมาจากกำลังอัดของอิฐมากกว่าวัสดุประสาน

จากตัวอย่างงานวิจัยในอดีตที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่ารายงานผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับสมบัติวัสดุอิฐก่อโบราณของไทยยังมีอยู่อย่างจำกัด ยังมีความจำเป็นที่จะต้องรวบรวมข้อมูลและทดสอบสมบัติวัสดุโบราณจากแหล่งต่าง ๆ เพิ่มขึ้นเพื่อให้เกิดเป็นฐานข้อมูลในด้านสมบัติวัสดุโบราณของไทยที่ครอบคลุมเพียงพอต่อการอนุรักษ์โบราณสถานในแต่ละยุคสมัยได้อย่างถูกต้องเหมาะสมต่อไปในอนาคต

งานวิจัยนี้จึงมุ่งต่อยอดข้อมูลสมบัติวัสดุอิฐก่อทดแทนและอิฐก่อโบราณที่ใช้ในการบูรณะโครงสร้างโบราณสถานประเภทอิฐก่อ โดยแสดงผลการทดสอบกำลังอัด และแนวทางการหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อโบราณ อิฐก่อทดแทนทั้งที่ใช้วัสดุประสาน และไม่ใช่วัสดุประสาน โดยวัสดุที่ใช้ในการทดสอบทั้งอิฐก่อโบราณ อิฐก่อทดแทน และปูนหมัก ได้รับความอนุเคราะห์จากอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาภายใต้โครงการอนุรักษ์วัดกระเจี ซึ่งผลการศึกษาจะสามารถนำไปใช้ต่อยอดเป็นฐานข้อมูลทางวิศวกรรมด้านวัสดุโบราณสำหรับประกอบการพิจารณาบูรณะโบราณสถานอื่น ๆ เพื่อการอนุรักษ์ต่อไป



รูปที่ 1 ตัวอย่างความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอิฐของโครงสร้างวัดกระเจี [4]



รูปที่ 2 ตัวอย่างความเสียหายของโครงสร้างอิฐวัดทัพเก่า [5]



รูปที่ 3 ตัวอย่างความเสียหายของโครงสร้างอิฐวัดหนองตะกุ่ม [5]

## 2. วัสดุและการเตรียมตัวอย่าง

### 2.1. วัสดุทดสอบ

#### 2.1.1. ปูนก่อ

ปูนก่อที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นปูนก่อที่ช่างฝีมือจากสำนักงานอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาทำการผสมตามกรรมวิธีที่ใช้ในการบูรณะโบราณสถานและแนวทางของกรมศิลปากร ซึ่งใช้ปูนหมักผสมกับทรายเป็นปูนก่อหรือวัสดุประสาน ในอัตราส่วนปูนต่อทราย เท่ากับ 1 ต่อ 4.88 ตามข้อกำหนดในโครงการอนุรักษ์วัดกระเจี๊วที่เกิดจากการตรวจสอบทางวิทยาศาสตร์จากเศษวัสดุปูนก่อที่ได้จากงานบูรณะเจดีย์วัดกระเจี๊ว

#### 2.1.2. อิฐทดแทน

คือ อิฐที่ผลิตโดยกระบวนการผลิตแบบโบราณเพื่อใช้ในการบูรณะโบราณสถาน โดยอิฐทดแทนที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นอิฐทดแทนเต็มตามแนวราบขนาด 15x30x5 ซม.<sup>3</sup> ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 อิฐทดแทนเต็มแผ่นตามแนวราบ

#### 2.1.3. อิฐก่อทดแทน

การศึกษานี้จะจัดทำอิฐก่อทดแทนจากการนำอิฐทดแทนมาก่อเป็นชั้น ๆ โดยใช้อิฐทดแทนจำนวน 6 แผ่น ก่อในรูปแบบปริซึมสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 15x30x30 ซม.<sup>3</sup> จำนวน 1 ตัวอย่าง โดยในการทดสอบได้แบ่งอิฐก่อทดแทนเป็น 2 รูปแบบ ดังรูปที่ 5 ได้แก่ อิฐก่อทดแทนที่ไม่ใช้วัสดุประสาน 3 ตัวอย่าง และอิฐก่อทดแทนที่ใช้วัสดุประสาน 3 ตัวอย่าง โดยในส่วนของอิฐก่อทดแทนที่ใช้วัสดุประสานนั้นแต่ละชั้นระหว่างอิฐจะใช้ความหนาของปูนก่อ 1 ซม. และมีอายุปูนก่อประมาณ 1 ปี



(A) (B)

รูปที่ 5 (A) อิฐก่อทดแทนที่ใช้วัสดุประสาน  
(B) อิฐก่อทดแทนที่ไม่ใช้วัสดุประสาน

#### 2.1.4. อิฐก่อโบราณ

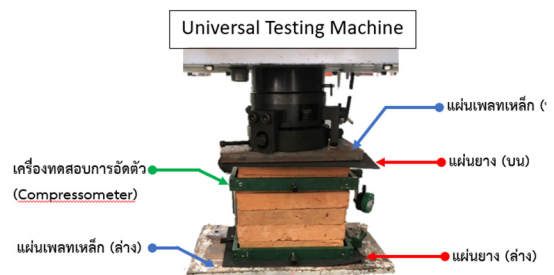
หมวดอิฐก่อโบราณ คืออิฐก่อที่ถูกก่อกำขึ้นจากเศษซากอิฐโบราณที่ได้จากการบูรณะซ่อมแซมเจดีย์วัดกระเจี๊ว ดังนั้นขนาดของอิฐก่อโบราณที่ใช้จึงมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้การศึกษานี้พยายามคัดเศษอิฐที่มีขนาดประมาณ 15x15x5 ซม.<sup>3</sup> นำมาก่อเรียงต่อกัน 6 ชั้นแบบปริซึมได้จำนวน 1 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 6 โดยใช้ปูนก่อที่มีความหนา 1 ซม. เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยมีอายุประมาณ 1 ปี เช่นเดียวกับอิฐก่อที่ผลิตจากอิฐก่อทดแทน



รูปที่ 6 อิฐก่อโบราณ

### 2.2. การเตรียมตัวอย่าง

อิฐก่อทดแทนในรูปแบบไม่ใช้วัสดุประสาน ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจะใช้เครื่องเจียรขนาด 4 นิ้ว ปรับพื้นผิวของอิฐที่ขรุขระให้เรียบสม่ำเสมอมากที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อลดปัญหาเรื่องการถ่ายแรงที่ไม่สม่ำเสมอรวมถึงความเสียหายเฉพาะจุดให้น้อยที่สุดสำหรับการเตรียมตัวอย่างอิฐก่อทดแทนที่ใช้วัสดุประสาน และอิฐก่อโบราณนั้น จะเป็นการเตรียมจากสถานที่จริงโดยช่างชำนาญการภายใต้โครงการอนุรักษ์วัดกระเจี๊ว



รูปที่ 7 การติดตั้งเครื่องมือสำหรับทดสอบกำลังอัดและค่าคงที่ยืดหยุ่น

## 3. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

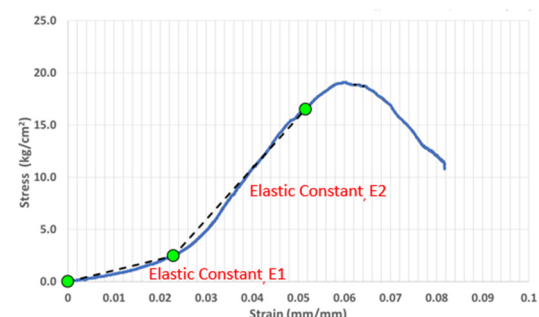
### 3.1. การทดสอบกำลังอัดอิฐก่อ

การทดสอบกำลังอัดของอิฐก่อ อาศัยแนวทางการทดสอบวัสดุก่อตามมาตรฐาน ASTM C1314-18 [6] ซึ่งทดสอบกำลังอัดผ่านเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ที่อัตราการกด 5 มม./นาที โดยก่อนเริ่มการทดสอบจะนำเพลทเหล็กและแผ่นยางรองผิวด้านบน และผิวด้านล่างของตัวอย่างทดสอบดังรูปที่ 7

เพื่อช่วยให้ตัวอย่างทดสอบรับการกระจายแรงอัดอย่างทั่วพื้นผิว  
ด้านบนและด้านล่าง

### 3.2. การทดสอบค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อ

ตัวอย่างในการทดสอบเพื่อหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อจะ  
ทดสอบพร้อมกับการทดสอบกำลังอัด โดยที่จะติดตั้งเครื่องมีวัด  
ระยะการยุบตัว (Compressometer) ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยเฉพาะ  
สำหรับงานวิจัยนี้ ดังรูปที่ 7 โดยที่ระยะการอัดตัวสามารถวัดได้  
จากทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนียวแบบเชิงเส้น  
(Linear Variable Differential) ที่มีการเก็บระยะการอัดตัวของ  
อิฐก่อผ่านเครื่องบันทึกข้อมูลแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Data logger)  
ทั้งนี้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของอิฐก่อ  
มีลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้น การศึกษาจึงนำเสนอแนวทางการหา  
ค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อเป็น 2 ช่วง ดังรูปที่ 8 ซึ่งกำหนดให้  
ค่าคงที่ยืดหยุ่นช่วงแรกเป็นค่า E1 และค่าที่ยืดหยุ่นช่วงที่สองเป็นค่า  
E2 โดยตำแหน่งจุดปลายของทั้งสองช่วงพิจารณาจากจุดที่มีการ  
เปลี่ยนแปลงความชันสูงสุดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความ  
เค้นกับความเครียดของอิฐก่อในแต่ละช่วง โดยที่พฤติกรรมใน  
ช่วงแรกที่เกิดขึ้นนี้อาจมีผลมาจากความพรุน หรือการเคลื่อนตัว  
สัมผัสกันของวัสดุอยู่ในช่วงต้นที่เกิดจากช่องว่างบริเวณผิวสัมผัส  
ระหว่างอิฐและวัสดุประสาน [7] จากพฤติกรรมนี้การประเมิน  
ค่าคงที่ยืดหยุ่นเพียงค่าเดียวอาจทำให้การคาดการณ์พฤติกรรมที่  
แท้จริงของวัสดุที่จะใช้ในแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง  
มีความคลาดเคลื่อนไปมาก ดังนั้นการพิจารณาประมาณพฤติกรรม  
การรับแรงอัดของอิฐก่อเป็นช่วงยืดหยุ่น 2 ช่วงจะทำให้สามารถ  
ประมาณเส้นโค้งความสัมพันธ์ได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมาก  
ยิ่งขึ้น โดยทั้งนี้วิศวกรหรือผู้ประเมินโครงสร้างประเภทอิฐก่อ  
สามารถนำค่าคงที่ยืดหยุ่นทั้ง 2 ค่านี้มาใช้ประกอบการตัดสินใจใน  
ขั้นตอนการออกแบบจำลองและกำหนดสมบัติวัสดุสำหรับการ  
วิเคราะห์โครงสร้างให้มีพฤติกรรมของวัสดุที่ใกล้เคียงกับสภาพ  
โครงสร้างจริงมากที่สุด



รูปที่ 8 ค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อทั้ง 2 ช่วง

## 4. ผลการทดสอบ

### 4.1. ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าคงที่ยืดหยุ่นของ อิฐก่อทดแทน

#### 4.1.1. ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าคงที่ยืดหยุ่นของ อิฐก่อทดแทนที่ใช้วัสดุประสาน

จากตารางที่ 1 แสดงค่ากำลังอัดและค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อ  
ทดแทนที่ใช้วัสดุประสาน ซึ่งจากการทดสอบพบว่าอิฐก่อทดแทนที่  
ใช้วัสดุประสานจะมีกำลังอัดอยู่ในช่วง 19.1 - 20.0 กก./ซม.<sup>2</sup> และมี  
ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19.4 กก./ซม.<sup>2</sup> ในส่วนของค่าคงที่ยืดหยุ่นใน  
ช่วงแรก (E1) จะมีค่าอยู่ในช่วง 61.9 - 186.4 กก./ซม.<sup>2</sup> และ  
ค่าคงที่ยืดหยุ่นในช่วงที่ 2 (E2) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 350.4 -  
702.3 กก./ซม.<sup>2</sup> โดยรูปที่ 9 ถึง รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์  
ระหว่างความเค้นกับความเครียดของอิฐก่อที่ใช้วัสดุประสาน พร้อม  
กับการประมาณช่วงยืดหยุ่นด้วยเส้นตรง 2 ช่วง

#### 4.1.2. ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าคงที่ยืดหยุ่นของ อิฐก่อทดแทนที่ไม่ใช้วัสดุประสาน

ตารางที่ 2 แสดงค่ากำลังอัดและค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อ  
ทดแทนที่ไม่ใช้วัสดุประสาน ผลการทดสอบพบว่าอิฐก่อทดแทนที่ไม่  
ใช้วัสดุประสานจะมีกำลังอัดอยู่ในช่วง 16.0 - 24.4 กก./ซม.<sup>2</sup> มี  
ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 20.1 กก./ซม.<sup>2</sup> ในส่วนของค่าคงที่ยืดหยุ่นใน  
ช่วงแรก (E1) จะมีค่าอยู่ในช่วง 61.7 - 93.4 กก./ซม.<sup>2</sup> และค่าคงที่  
ยืดหยุ่นในช่วงที่ 2 (E2) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 438.0 - 806.5  
กก./ซม.<sup>2</sup> โดยจากรูปที่ 12 ถึงรูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  
ความเค้นกับความเครียดของอิฐก่อที่ไม่ใช้วัสดุประสาน พร้อม  
กับการประมาณช่วงยืดหยุ่นด้วยเส้นตรง 2 ช่วง

#### 4.1.3. ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าคงที่ยืดหยุ่นของ อิฐก่อโบราณ

ตารางที่ 3 แสดงค่ากำลังอัด และค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อ  
โบราณจำนวน 1 ตัวอย่าง ซึ่งผลการทดสอบพบว่าอิฐก่อโบราณจะมี  
กำลังอัดเท่ากับ 25.2 กก./ซม.<sup>2</sup> ค่าคงที่ยืดหยุ่นในช่วงแรก (E1) มีค่า  
เท่ากับ 110.2 กก./ซม.<sup>2</sup> และค่าคงที่ยืดหยุ่นในช่วงที่ 2 (E2) มีค่า  
เท่ากับ 1467.7 กก./ซม.<sup>2</sup> โดยรูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  
ความเค้นกับความเครียดของอิฐก่อโบราณที่มีวัสดุประสาน พร้อม  
กับการประมาณช่วงยืดหยุ่นด้วยเส้นตรง 2 ช่วง

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบอิฐก่อทดแทนที่ใช้วัสดุประสาน

อิฐก่อทดแทนที่ใช้วัสดุประสาน			
ตัวอย่าง	Ultimate Stress, $\sigma_{max}$ (ksc)	E1 (ksc)	E2 (ksc)
A1	20.0	186.4	702.3
A2	19.1	148.5	574.7
A3	19.1	61.9	350.4

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบอิฐก่อทดแทนที่ไม่ใช้วัสดุประสาน

อิฐก่อทดแทนที่ไม่ใช้วัสดุประสาน			
ตัวอย่าง	Ultimate Stress, $\sigma_{max}$ (ksc)	E1 (ksc)	E2 (ksc)
B1	19.9	93.4	806.5
B2	16.0	80.3	438.0
B3	24.4	61.7	744.8

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบอิฐก่อโบราณ

อิฐก่อโบราณ			
ตัวอย่าง	Ultimate Stress, $\sigma_{max}$ (ksc)	E1 (ksc)	E2 (ksc)
C1	25.2	110.2	1467.7

เมื่อพิจารณาค่ากำลังอัดเฉลี่ยของอิฐก่อทดแทนทั้งที่ใช้วัสดุประสาน และไม่ใช้วัสดุประสาน พบว่าค่ากำลังอัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของสุทัศน์และคณะ [4] ที่ได้ทำการทดสอบอิฐก่อทดแทนที่ใช้วัสดุประสานเป็นปูนหมักร่วมกับเถ้าแกลบ และเถ้าถ่านหินตามแต่ละส่วนผสม จากรายงานชี้ให้เห็นว่ากำลังอัดของอิฐก่อมีผลมาจากตัวอิฐมากกว่าวัสดุประสานที่ใช้ ทำให้กำลังอัดของอิฐก่อที่มีส่วนผสมของวัสดุประสานที่แตกต่างกันไปมีค่ากำลังอัดไม่แตกต่างกันมากนัก ในส่วนอิฐก่อโบราณที่ทดสอบในงานวิจัยนี้พบว่ามีกำลังอัดที่สูงกว่าตัวอย่างอิฐก่อที่ทำการทดสอบทั้งหมด แต่อย่างไรก็ตามอิฐก่อโบราณที่รวบรวมได้และทำการทดสอบมีเพียง 1 ตัวอย่าง ซึ่งสามารถใช้เป็นเพียงแนวทางของข้อมูลโดยที่มีอาจสรุปได้ว่าอิฐก่อโบราณมีกำลังอัดที่สูงกว่าอิฐก่อทดแทน และในส่วนของค่าคงที่ยืดหยุ่นช่วงที่ 1 (E1) และค่าคงที่ยืดหยุ่นช่วงที่ 2 (E2) ของตัวอย่างทั้งหมด พบว่ามีค่าค่อนข้างมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด การรวบรวมตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบจากโบราณสถานแหล่งต่าง ๆ ยังเป็นสิ่งจำเป็น

จากงานวิจัยของสุนัย และคณะ [3] ที่ได้รายงานค่ากำลังอัดของอิฐทดแทนก่อนเดี่ยวลักษณะแบบลูกบาศก์ และอิฐเต็มแผ่นตามแนวราบที่ขนาดต่าง ๆ โดยอิฐลูกบาศก์ที่ใช้ทดสอบมีขนาด 4x4x4 ซม.<sup>3</sup> 5x5x5 ซม.<sup>3</sup> และ 8x8x8 ซม.<sup>3</sup> อิฐเต็มแผ่นตามแนวราบมีขนาด 15x30x4 ซม.<sup>3</sup> 15x30x5 ซม.<sup>3</sup> และ 15x30x8 ซม.<sup>3</sup> ซึ่งตารางที่ 4 จะแสดงค่ากำลังอัดเฉลี่ยของอิฐก่อก่อนเดี่ยวที่สุนัยและคณะได้ทำการทดสอบ เมื่อทำการเทียบสัดส่วนค่ากำลังและค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อที่ได้จากการศึกษานี้กับอิฐก่อก่อนเดี่ยวของสุนัยและ

คณะ พบว่าจะได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 5 ถึง ตารางที่ 7 ซึ่งสัดส่วนเหล่านี้สามารถใช้ประมาณค่ากำลังและค่าคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อจากกำลังอิฐก่อก่อนเดี่ยวในรูปแบบต่าง ๆ ได้

จากตารางที่ 5 พบว่าเมื่อทำการเทียบสัดส่วนผลของกำลังอัดอิฐก่อโบราณกับอิฐทดแทนรูปลูกบาศก์ขนาดต่าง ๆ ค่าสัดส่วนที่ได้จะอยู่ในช่วง 0.37-0.57 และเมื่อทำการเทียบกับอิฐทดแทนเต็มแผ่นตามแนวราบขนาดต่าง ๆ ค่าสัดส่วนจะอยู่ในช่วง 0.16-0.25 ในการเทียบสัดส่วนกับค่าคงที่ยืดหยุ่นช่วงแรก (E1) กับกำลังอัดอิฐลูกบาศก์ขนาดต่าง ๆ ค่าสัดส่วนที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 1.62-2.50 และเมื่อเทียบกับอิฐเต็มแผ่นตามแนวราบขนาดต่าง ๆ ค่าสัดส่วนจะอยู่ในช่วง 0.69-1.09 ในการเทียบสัดส่วนค่าคงที่ยืดหยุ่นช่วงที่ 2 (E2) กับกำลังอัดอิฐลูกบาศก์ขนาดต่าง ๆ ค่าสัดส่วนที่ได้จะอยู่ในช่วง 21.63-33.33 และเมื่อทำการเทียบกับอิฐเต็มแผ่นตามแนวราบขนาดต่าง ๆ ค่าสัดส่วนมีค่าอยู่ในช่วง 9.23-14.55

จากตารางที่ 6 พบว่าเมื่อทำการเทียบสัดส่วนผลของกำลังอัดอิฐก่อทดแทนที่ใช้วัสดุประสานกับอิฐทดแทนรูปลูกบาศก์ขนาดต่าง ๆ ค่าสัดส่วนเฉลี่ยที่ได้จะอยู่ในช่วง 0.29-0.44 และเมื่อทำการเทียบกับอิฐทดแทนเต็มแผ่นตามแนวราบขนาดต่าง ๆ ค่าสัดส่วนเฉลี่ยจะอยู่ในช่วง 0.12-0.19 ในการเทียบสัดส่วนกับค่าคงที่ยืดหยุ่นช่วงแรก (E1) กับกำลังอัดอิฐลูกบาศก์ขนาดต่าง ๆ ค่าสัดส่วนเฉลี่ยที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 1.95-3.00 และเมื่อเทียบกับอิฐเต็มแผ่นตามแนวราบขนาดต่าง ๆ ค่าสัดส่วนเฉลี่ยจะอยู่ในช่วง 0.83-1.31 ในการเทียบสัดส่วนค่าคงที่ยืดหยุ่นช่วงที่ 2 (E2) กับกำลังอัดอิฐลูกบาศก์ขนาดต่าง ๆ ค่าสัดส่วนเฉลี่ยที่ได้จะอยู่ในช่วง 7.99-12.32 และเมื่อทำการเทียบกับอิฐเต็มแผ่นตามแนวราบขนาดต่าง ๆ ค่าสัดส่วนเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วง 3.41-5.38

จากตารางที่ 7 พบว่าเมื่อทำการเทียบสัดส่วนผลของกำลังอัดอิฐก่อทดแทนที่ไม่ใช้วัสดุประสานกับอิฐทดแทนรูปลูกบาศก์ขนาดต่าง ๆ ค่าสัดส่วนเฉลี่ยที่ได้จะอยู่ในช่วง 0.30-0.46 และเมื่อทำการเทียบกับอิฐทดแทนเต็มแผ่นตามแนวราบขนาดต่าง ๆ ค่าสัดส่วนเฉลี่ยจะอยู่ในช่วง 0.13-0.20 ในการเทียบสัดส่วนกับค่าคงที่ยืดหยุ่นช่วงแรก (E1) กับกำลังอัดอิฐลูกบาศก์ขนาดต่าง ๆ ค่าสัดส่วนเฉลี่ยที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 1.16-1.78 และเมื่อเทียบกับอิฐเต็มแผ่นตามแนวราบขนาดต่าง ๆ ค่าสัดส่วนเฉลี่ยจะอยู่ในช่วง 0.49-0.78 ในการเทียบสัดส่วนค่าคงที่ยืดหยุ่นช่วงที่ 2 (E2) กับกำลังอัดอิฐลูกบาศก์ขนาดต่าง ๆ ค่าสัดส่วนเฉลี่ยที่ได้จะอยู่ในช่วง 9.77-15.06 และเมื่อทำการเทียบกับอิฐเต็มแผ่นตามแนวราบขนาดต่าง ๆ ค่าสัดส่วนเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วง 4.17-6.58

ตารางที่ 4 กำลังอัดเฉลี่ยของอิฐลูกบาศก์และอิฐเต็มแผ่นตาม  
แนวราบ

Size (cm <sup>3</sup> )	Average Ultimate Stress, $f'_b$ (ksc)
4x4x4	44.04
5x5x5	59.71
8x8x8	67.87
15x30x4	142.97
15x30x5	159.03
15x30x8	100.84

ตารางที่ 5 สัดส่วนกำลังอัดอิฐก่อโบราณ และค่าคงที่ยืดหยุ่นต่อ  
กำลังอัดเฉลี่ยของอิฐก้อนเดียว

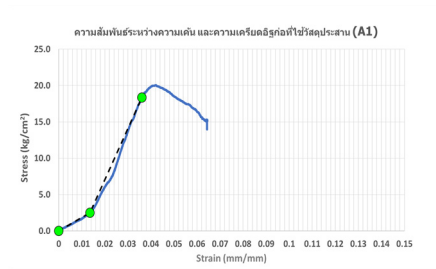
อิฐก่อโบราณ						
ตัวอย่าง	$f'_m/f'_b$					
	Cube Size			Flat Size		
	4x4x4	5x5x5	8x8x8	15x30x4	15x30x5	15x30x8
C1	0.57	0.42	0.37	0.18	0.16	0.25
E1/ $f'_b$						
ตัวอย่าง	Cube Size			Flat Size		
	4x4x4	5x5x5	8x8x8	15x30x4	15x30x5	15x30x8
C1	2.50	1.85	1.62	0.77	0.69	1.09
E2/ $f'_b$						
ตัวอย่าง	Cube Size			Flat Size		
	4x4x4	5x5x5	8x8x8	15x30x4	15x30x5	15x30x8
C1	33.33	24.58	21.63	10.27	9.23	14.55

ตารางที่ 6 สัดส่วนกำลังอัดอิฐก่อที่ใช้วัสดุประสาน และค่าคงที่  
ยืดหยุ่นต่อกำลังอัดเฉลี่ยของอิฐก้อนเดี่ยว

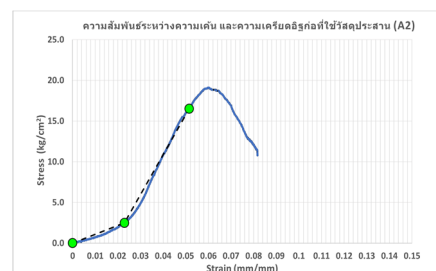
อิฐก่อทดแทนที่ใช้วัสดุประสาน						
ตัวอย่าง	$f'_m/f'_b$					
	Cube Size			Flat Size		
	4x4x4	5x5x5	8x8x8	15x30x4	15x30x5	15x30x8
A1	0.46	0.34	0.30	0.14	0.13	0.20
A2	0.43	0.32	0.28	0.13	0.12	0.19
A3	0.43	0.32	0.28	0.13	0.12	0.19
Average	0.44	0.32	0.29	0.14	0.12	0.19
E1/ $f'_b$						
ตัวอย่าง	Cube Size			Flat Size		
	4x4x4	5x5x5	8x8x8	15x30x4	15x30x5	15x30x8
A1	4.23	3.12	2.75	1.30	1.17	1.85
A2	3.37	2.49	2.19	1.04	0.93	1.47
A3	1.40	1.04	0.91	0.43	0.39	0.61
Average	3.00	2.22	1.95	0.93	0.83	1.31
E2/ $f'_b$						
ตัวอย่าง	Cube Size			Flat Size		
	4x4x4	5x5x5	8x8x8	15x30x4	15x30x5	15x30x8
A1	15.95	11.76	10.35	4.91	4.42	6.96
A2	13.05	9.62	8.47	4.02	3.61	5.70
A3	7.96	5.87	5.16	2.45	2.20	3.47
Average	12.32	9.08	7.99	3.79	3.41	5.38

ตารางที่ 7 สัดส่วนกำลังอัดอิฐก่อที่ไม่ใช้วัสดุประสาน และค่าคงที่  
ยืดหยุ่นต่อกำลังอัดเฉลี่ยของอิฐก้อนเดี่ยว

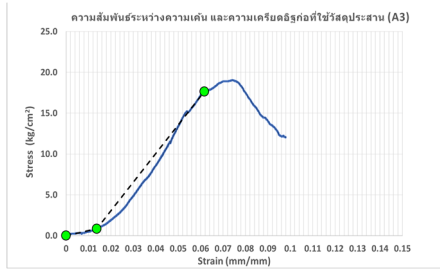
อิฐก่อทดแทนที่ไม่ใช้วัสดุประสาน						
ตัวอย่าง	$f'_m/f'_b$					
	Cube Size			Flat Size		
	4x4x4	5x5x5	8x8x8	15x30x4	15x30x5	15x30x8
B1	0.45	0.33	0.29	0.14	0.13	0.20
B2	0.36	0.27	0.24	0.11	0.10	0.16
B3	0.55	0.41	0.36	0.17	0.15	0.24
Average	0.46	0.34	0.30	0.14	0.13	0.20
E1/ $f'_b$						
ตัวอย่าง	Cube Size			Flat Size		
	4x4x4	5x5x5	8x8x8	15x30x4	15x30x5	15x30x8
B1	2.12	1.56	1.38	0.65	0.59	0.93
B2	1.82	1.34	1.18	0.56	0.50	0.80
B3	1.40	1.03	0.91	0.43	0.39	0.61
Average	1.78	1.31	1.16	0.55	0.49	0.78
E2/ $f'_b$						
ตัวอย่าง	Cube Size			Flat Size		
	4x4x4	5x5x5	8x8x8	15x30x4	15x30x5	15x30x8
B1	18.31	13.51	11.88	5.64	5.07	8.00
B2	9.95	7.34	6.45	3.06	2.75	4.34
B3	16.91	12.47	10.97	5.21	4.68	7.39
Average	15.06	11.11	9.77	4.64	4.17	6.58



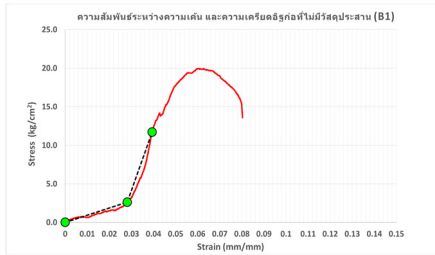
รูปที่ 9 ตำแหน่งจุดคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อทดแทนที่ใช้วัสดุ  
ประสาน (A1)



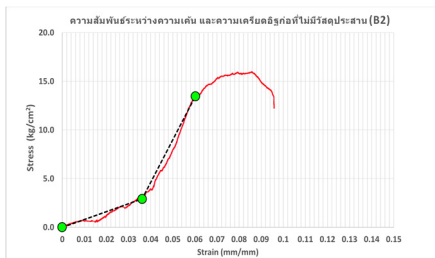
รูปที่ 10 ตำแหน่งจุดคงที่ยืดหยุ่นของอิฐก่อทดแทน ที่ใช้วัสดุ  
ประสาน (A2)



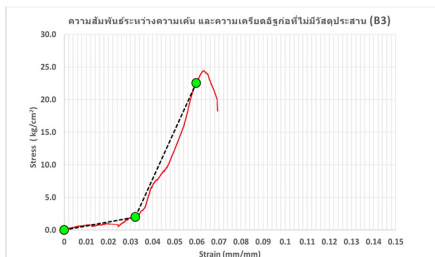
รูปที่ 11 ตำแหน่งจุดคงที่ยึดหุ่ยของอิฐก่อทดแทนที่ใช้วัสดุประสาน (A3)



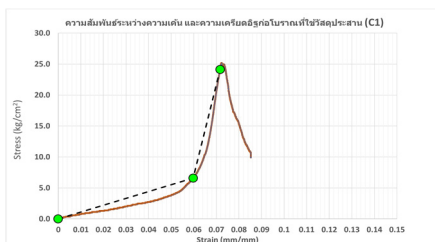
รูปที่ 12 ตำแหน่งจุดคงที่ยึดหุ่ยของอิฐก่อทดแทนที่ไม่ใช้วัสดุประสาน (B1)



รูปที่ 13 ตำแหน่งจุดคงที่ยึดหุ่ยของอิฐก่อทดแทนที่ไม่ใช้วัสดุประสาน (B2)



รูปที่ 14 ตำแหน่งจุดคงที่ยึดหุ่ยของอิฐก่อทดแทนที่ไม่ใช้วัสดุประสาน (B3)



รูปที่ 15 ตำแหน่งจุดคงที่ยึดหุ่ยของอิฐก่อโบราณ (C1)

#### 4.2. ตำแหน่งจุดปลายของช่วงยึดหุ่ยที่ 1 และ 2 โดยร้อยละของค่าความเค้นสูงสุด

ในการหาค่าคงที่ยึดหุ่ยทั้ง 2 ช่วงโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความชัน จะทำให้ได้ตำแหน่งจุดปลายของช่วงยึดหุ่ยที่ 1 และ 2 สำหรับหาค่าคงที่ยึดหุ่ยทั้ง 2 ช่วง ซึ่งเมื่อนำค่าแต่ละจุดมาคิดเป็นร้อยละของความเค้นสูงสุด ( $\sigma_{max}$ ) จะสามารถทราบได้ถึงช่วงของค่าร้อยละความเค้นสูงสุดในการประมาณตำแหน่งจุดปลายช่วงยึดหุ่ยที่ 1 และ 2 ได้ โดยรูปที่ 16 แสดงตัวอย่างการประมาณจุดปลายช่วงยึดหุ่ยที่ 2 เป็นค่าร้อยละของความเค้นสูงสุดของอิฐก่อแต่ละแบบ และในตารางที่ 8 แสดงตำแหน่งจุดปลายช่วงยึดหุ่ยทั้ง 2 ช่วง (E1 Point และ E2 Point) เป็นค่าร้อยละของความเค้นสูงสุดสำหรับอิฐก่อแต่ละรูปแบบ

จากการพิจารณาผลที่ได้ตามตารางที่ 8 พบว่าอิฐก่อทดแทนที่ใช้วัสดุประสานมีตำแหน่งจุดปลายช่วงยึดหุ่ยที่ 1 (E1 Point) ที่คิดเป็นร้อยละของค่าความเค้นสูงสุด อยู่ในช่วง  $0.04\sigma_{max}-0.22\sigma_{max}$  โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.13\sigma_{max}$  และตำแหน่งจุดปลายช่วงยึดหุ่ยที่ 2 (E2 Point) คิดเป็นร้อยละของค่าความเค้นสูงสุดอยู่ในช่วง  $0.74\sigma_{max}-0.93\sigma_{max}$  โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.86\sigma_{max}$

สำหรับอิฐก่อทดแทนที่ไม่ใช้วัสดุประสาน ตำแหน่งจุดปลายช่วงยึดหุ่ยที่ 1 (E1 Point) คิดเป็นร้อยละของค่าความเค้นสูงสุดอยู่ในช่วง  $0.08\sigma_{max}-0.18\sigma_{max}$  โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.13\sigma_{max}$  และตำแหน่งจุดปลายช่วงยึดหุ่ยที่ 2 (E2 Point) จะอยู่ในช่วง  $0.59\sigma_{max}-0.92\sigma_{max}$  โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.78\sigma_{max}$

ในส่วนอิฐก่อโบราณที่มีเพียงตัวอย่างเดียวพบว่าตำแหน่งจุดปลายช่วงยึดหุ่ยที่ 1 (E1 Point) จะคิดเป็นร้อยละของค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ  $0.26\sigma_{max}$  และตำแหน่งจุดปลายช่วงยึดหุ่ยที่ 2 (E2 Point) คิดเป็นร้อยละของค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ  $0.96\sigma_{max}$

#### 5. สรุปผล

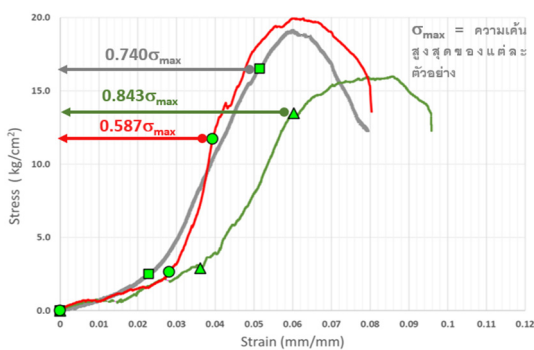
การศึกษานี้นำเสนอผลการทดสอบกำลังอัดและค่าคงที่ยึดหุ่ยของอิฐก่อโบราณและอิฐก่อทดแทนรูปทรงปริซึมที่ใช้ในงานอนุรักษ์โบราณสถาน โดยสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1. ค่ากำลังอัดสำหรับอิฐก่อทดแทนที่ใช้วัสดุประสานมีค่าอยู่ในช่วง 19.1 - 20.0 กก./ซม.<sup>2</sup> และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19.4 กก./ซม.<sup>2</sup>
2. ค่ากำลังอัดสำหรับอิฐก่อทดแทนที่ไม่ใช้วัสดุประสานมีค่าอยู่ในช่วง 16.0 - 24.4 กก./ซม.<sup>2</sup> และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 20.1 กก./ซม.<sup>2</sup>
3. ค่ากำลังอัดสำหรับอิฐก่อโบราณที่ใช้วัสดุประสานมีค่าเท่ากับ 25.2 กก./ซม.<sup>2</sup>

4. ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของอิฐก่อมีลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถประมาณเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในช่วงยืดหยุ่นให้เป็นเส้นตรง 2 ช่วงได้ โดยสามารถคำนวณเป็นค่าคงที่ยืดหยุ่น 2 ค่า ได้แก่ค่า E1 และ E2 โดยอิฐก่อทดแทนจะมีค่าคงที่ยืดหยุ่นค่าแรก E1 อยู่ในช่วง 61.7–186.4 กก./ซม.<sup>2</sup> และค่าคงที่ยืดหยุ่นค่าที่สอง E2 อยู่ในช่วง 350.4-806.5 กก./ซม.<sup>2</sup> ส่วนกรณีอิฐก่อโบราณจะมีค่าคงที่ยืดหยุ่นค่าแรก E1 ประมาณ 110.2 กก./ซม.<sup>2</sup> และค่าคงที่ยืดหยุ่นค่าที่สอง E2 จะมีค่าประมาณ 1467.7 กก./ซม.<sup>2</sup>

ตารางที่ 8 ร้อยละความเค้นสูงสุดในการกำหนดตำแหน่งจุดปลายของช่วงยืดหยุ่นทั้ง 2 ช่วง

ตัวอย่าง	Ultimate Stress, $\sigma_{max}$ (ksc)	E1 point	
		ร้อยละ $\sigma_{max}$	ร้อยละ $\sigma_{max}$
อิฐก่อทดแทนที่ใช้วัสดุประสาน			
A1	20.0	0.13	0.91
A2	19.1	0.22	0.74
A3	19.1	0.04	0.93
Average		0.13	0.86
อิฐก่อทดแทนที่ไม่ใช้วัสดุประสาน			
B1	19.9	0.13	0.59
B2	16.0	0.18	0.84
B3	24.4	0.08	0.92
Average		0.13	0.78
อิฐก่อโบราณ			
C1	25.2	0.26	0.96
Average all		0.15	0.84



รูปที่ 16 ตัวอย่างการประเมินตำแหน่งจุดปลายของช่วงยืดหยุ่นที่ 2 ด้วยค่าร้อยละของความเค้นสูงสุด

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และได้รับการสนับสนุนวัสดุทดสอบจากอุทยานประวัติศาสตร์พระนครคีรีอยุธยา

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] นวลลักษณ์ วัลลันทชาติ (2561). *ปูนในโบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครคีรีอยุธยาแหล่งมรดกโลก*. คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, ประเทศไทย.
- [2] สุดชาย พานสุวรรณ (2543). *การวิเคราะห์โบราณสถานก่ออิฐในเชิงวิศวกรรม*. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ประเทศไทย.
- [3] สุนัย โตศิริมงคล, พิรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์, ชัยณรงค์ อธิสกุล (2563). สมบัติทางกลของอิฐทดแทนเพื่อการอนุรักษ์โบราณสถานของไทย. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25*, 15-17 กรกฎาคม, ชลบุรี, ประเทศไทย.
- [4] สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัยณรงค์ อธิสกุล, รกดิพงษ์ สหมิตรมงคล และเสนห์ มหาลม (2562). *โครงการพัฒนาฐานข้อมูลทางวิศวกรรมเพื่อการประเมินและติดตามสภาพโครงสร้างโบราณสถานของไทย*. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 135-140.
- [5] ธงชัย สาโค, อานุกุม มณเฑียร, สาวชกานต์ ศรีสุโข, เจริญพงษ์ ชูหนูช, ชาญชัย ศรีภักฎญา, วิภาวดี สีหามาตย์ พิชญ์ ปานมี, เลิศ ทองคำ, ละเอียด พุ่มกลับ, สาวาทินี ถนอมพลกรัง และจินวัฒน์ นาควิจิตร (2561). *ทำเนียบโบราณสถานอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย*. อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย, สุโขทัย, ประเทศไทย, 262-272.
- [6] ASTM C1314-18, (2018). *Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prism*. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States.
- [7] Zahra T. and Dhanasekar M. (2016). *Prediction of masonry compressive behaviour using a damage mechanics inspired modelling method*. School of Civil Engineering and Built Environment, Queensland University of Technology, Brisbane, Australia.