

เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับป้อมก่ออิฐโบราณของไทย:

กรณีศึกษาป้อมมหากาฬ

3D Laser Scanning Technology and Finite Element Method for Thai Ancient Masonry Fort: A case study of Mahakarn Fort

กันตภณ จินทราคำ^{1,*} พีรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย² ก้องภพ วุชรเสวี³ ชัยณรงค์ อธิสกุล⁴ พรเกษม จงประดิษฐ์⁵ และ สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์⁶

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

*Corresponding author; E-mail address: kantapon.jin@mail.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการจัดทำข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติร่วมกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการอนุรักษ์ป้อมก่ออิฐโบราณของไทย โดยอาศัยป้อมมหากาฬเป็นกรณีศึกษา ข้อมูลดิจิทัลจำนวนมากของป้อมจะได้รับการจัดเก็บผ่านเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติแบบภาคพื้นดิน ข้อมูลที่ได้มาทั้งหมดจะนำไปประมวลผลเป็นแบบจำลองกลุ่มจุดพิคัด 3 มิติของป้อม โดยงานวิจัยนี้จะนำเสนอขนาดมิติและค่าระดับในสภาวะปัจจุบันตามทิศทางหลักของป้อมมหากาฬ นอกจากนี้จะนำตัวอย่างวัสดุก่อโบราณในตำแหน่งต่างๆของป้อมมาทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบค่าความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของวัสดุค่อ จากนั้นจะอาศัยข้อมูลกลุ่มจุดพิคัด 3 มิติมาพัฒนาเป็นแบบจำลองสมมติฐานซึ่งจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ แผนภาพแสดงการกระจายความเค้นในตำแหน่งต่างๆจัดทำขึ้นเพื่อระบุบริเวณที่จะเกิดค่าความเค้นสูงสุดทั้งในด้านที่เป็นแรงอัดและในด้านที่เป็นแรงดึง ผลการประเมินการเสถียรของป้อมอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรจะนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติในสภาพปัจจุบัน โดยผลการรวบรวมข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถใช้ประกอบการประเมินเสถียรภาพและติดตามสภาพโครงสร้างของป้อมมหากาฬได้ต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ, เทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติ ด้วยแสงเลเซอร์, ป้อมก่ออิฐ, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, อิฐก่อโบราณ

Abstract

This research presents the archiving of terrestrial 3D laser scan data and finite element method for preservation of Thai Ancient Masonry Fort. The Mahakarn fort is selected as a case study. By applying the terrestrial laser scanning technology, the digital massive data of the fort was archived. The obtained data was applied to develop the 3D point cloud model of the fort. The current dimensions and elevation of the fort in main

directions are reported in this paper. The samples of masonry materials were collected from various locations of the fort. The density and compressive strength of masonry materials were evaluated in laboratory. Based on the 3D point cloud data, the 3D solid model of the assumed original shape of the fort was developed. The finite element method was applied for structural analysis. The contour of principle stresses was developed to identify the locations of peak stressed in compression and tension zones. The deformation contour of the fort due to dead load and live load was predicted in comparison with the current 3D point cloud model. The obtained data can be applied for further stability assessment and structural health monitoring.

Keywords: 3D Laser Scanning Technology, Ancient Masonry, Finite Element Method, Masonry Fort, Point Cloud Data

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ป้อมมหากาฬเป็นโบราณสถานที่สำคัญในกรุงเทพมหานคร ตั้งอยู่บริเวณเชิงสะพานผ่านฟ้าลีลาศ ติดกับถนนมหาไชย แขวงบวรนิเวศ เขตพระนคร โดยสร้างขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2326 ในรัชสมัยพระบาทสมเด็จพระพุทธยอดฟ้าจุฬาโลกมหาราชเพื่อใช้เป็นป้อมปราการและกำแพงเมือง จากป้อมปราการทั้งหมด 14 แห่ง ป้อมปราการหลายแห่งถูกรื้อถอนและแทนที่ด้วยสิ่งก่อสร้างอื่น ๆ ตามกาลสมัยในเวลาต่อมา คงเหลือไว้เพียง 4 แห่ง ป้อมมหากาฬจึงได้รับการสงวนไว้เป็นอนุสรณ์สถานทางประวัติศาสตร์

ป้อมมหากาฬมีลักษณะทางสถาปัตยกรรมที่โดดเด่นตระการตา โดยภายนอกเป็นป้อมปราการรูปทรงแปดเหลี่ยมซ้อนกันสองชั้นเชื่อมถึงกันด้วยบันไดและชั้นที่สามเป็นหอระฆัง ประตูดุหอรบเป็นประตูบานไม้เล่นสีแดงน้ำหมาก หลังคาทรงจั่ว และภายในปูพื้นด้วยกระเบื้องดินเผา ความสูงจากพื้นดินถึงหลังคาหอระฆังประมาณ 15 เมตร ตัวป้อมปราการเชื่อมต่อกับกำแพงเมืองพระนครยาว 180 เมตร กำแพงทั้งหมดมีเชิงเทินลักษณะเป็นใบเสมา ที่กล่าวมาข้างต้นล้วนเป็นสถาปัตยกรรมที่มีเอกลักษณ์และหาชมได้

ยาก จึงได้มีการติดตามและบูรณะไว้ตลอดเวลาที่ผ่านมา จวบจนปัจจุบัน ป้อมมหากาฬได้รับการบูรณะรวมทั้งสิ้น 2 ครั้ง ในปี พ.ศ. 2502 และในปี พ.ศ. 2524 [1] โดยในรูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายของป้อมมหากาฬในปัจจุบัน



รูปที่ 1 ป้อมมหากาฬในปัจจุบัน [1]

โครงสร้างของป้อมมหากาฬในส่วนของกำแพงเป็นโครงสร้างก่ออิฐฉาบปูนที่มีความหนา ส่วนของฐานรากของกำแพงป้อมมหากาฬมีการใช้อิฐก่อฉาบครึ่ง เศษอิฐขนาดเล็ก เศษปูน มาถมเป็นชั้น ๆ ที่มีความหนาต่างกันไป โดยรวมแล้วฐานรากมีความหนาประมาณ 1.5 เมตร [1] ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากภาพลักษณะโดยรวมแล้วจะเห็นว่าป้อมมหากาฬมีลักษณะมั่นคงแข็งแรง และดูโดดเด่นสวยงามมาจนถึงปัจจุบัน

อย่างไรก็ตามด้วยอายุของป้อมมหากาฬที่มีมากกว่า 200 ปี และได้ผ่านการใช้งานในโอกาสสำคัญต่างๆ มาตามยุคสมัย ได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมต่าง ๆ อีกทั้งผลกระทบจากการปรับปรุงสภาพพื้นที่และคูคลองบริเวณใกล้เคียงตามความเจริญของเมือง ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อสภาพดินใต้ฐานรากของป้อมมหากาฬที่มีลักษณะเป็นดินอ่อน อันอาจเป็นเหตุให้ป้อมมหากาฬมีสภาพทรุดโทรมและเกิดความเสียหายตามกาลเวลา โดยในปี 2561 กรุงเทพมหานคร ได้กำหนดเป้าหมายในการดำเนินการบูรณะป้อมมหากาฬที่มีสภาพทรุดโทรมลงตามกาลเวลา และได้เปิดโอกาสให้คณะผู้วิจัยได้ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติเข้าทำการเก็บรวบรวมข้อมูลสภาพปัจจุบันของป้อมมหากาฬ รวมถึงข้อมูลวัสดุโบราณเพื่อทำการศึกษาและประเมินสภาพทางวิศวกรรม โดยคณะผู้วิจัยได้รับการสนับสนุนและความร่วมมือจากคณะผู้วิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การนำเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติซึ่งเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงมาใช้ในการจัดทำข้อมูลสภาพปัจจุบันของป้อมมหากาฬในครั้งนี้ นอกจากจะใช้ประกอบการประเมินสภาพทางวิศวกรรมเพื่อการอนุรักษ์ในปัจจุบันแล้ว ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้ยังเป็นประโยชน์ในระยะยาวในด้านการศึกษาทางโบราณคดี สถาปัตยกรรม และวิศวกรรม ตลอดจนเป็นข้อมูลสำหรับการประเมินและติดตามสภาพโครงสร้างป้อมมหากาฬเพื่อการอนุรักษ์ในอนาคตอีกด้วย อันจะทำให้คนรุ่นใหม่ได้มีโอกาสรับรู้คุณค่าของโบราณสถานซึ่งเป็นสิ่งสะท้อนให้เห็นถึงประวัติศาสตร์และวัฒนธรรมที่สำคัญของประเทศไทย

2. การศึกษาที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์

การศึกษานี้ใช้เครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดินในการเก็บข้อมูล โดยเครื่องมือนี้มีความสามารถในการบันทึกข้อมูลรูปร่าง สี และระยะของวัตถุต่าง ๆ รอบทิศทางจากจุดตั้งเครื่องมือได้อัตโนมัติ โดยอาศัยแสงเลเซอร์ในการบันทึกข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบของกลุ่มพิกัด (x,y,z) จำนวนมาก [2] โดยจำนวนและความละเอียดของข้อมูลที่ได้ขึ้นอยู่กับการตั้งค่าความละเอียดและคุณภาพในการเก็บข้อมูล [3]

ในการประมวลผลข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ ข้อมูลทั้งหมดจะได้รับการเชื่อมต่อเข้าด้วยกันโดยอาศัยวิธีการประมวลผลกลุ่มจุดด้วยภาพ (Image Based Registration) ซึ่งโปรแกรมจะทำการประมวลผลจากภาพ และข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ ที่มีการซ้อนทับกัน จากนั้นจะประมวลผลเพื่อเชื่อมต่อข้อมูลเข้าด้วยกันให้เป็นภาพกลุ่มจุดข้อมูล 3 มิติที่สมบูรณ์

2.2 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติร่วมกับโบราณสถาน

ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติซึ่งประกอบไปด้วยตำแหน่งพิกัดจำนวนมากของวัตถุ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินสภาพหรือวิเคราะห์ขนาดมิติได้โดยอาศัยซอฟต์แวร์เฉพาะทางต่าง ๆ ซึ่งในปัจจุบันได้มีผู้ศึกษาถึงวิธีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติสำหรับการประเมินสภาพและวิเคราะห์ขนาดมิติของข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ เช่น

Kwoczynska และคณะ และ Klapa และคณะ [4-5] ได้ประยุกต์ใช้เครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดินในการบันทึกข้อมูลดิจิทัลของโบราณสถานเพื่อใช้ในการประเมินสภาพและใช้งานในเชิงอนุรักษ์ จากการศึกษาพบว่าเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติมีความเหมาะสมในการใช้งานกับโบราณสถาน เนื่องจากสามารถวัดขนาดมิติในบริเวณที่ทำการวัดโดยทั่วไปได้ยาก และข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติสามารถนำไปใช้เป็นต้นแบบในการทำแบบจำลอง 3 มิติได้โดยมีขนาดมิติที่ถูกต้อง

สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์ และคณะ [6] ได้ใช้เครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดินในการเก็บบันทึกสภาพของโบราณสถานในจังหวัดอยุธยาทั้งหมด 8 แห่ง และได้ทำประมวลผลข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติไว้สำหรับการติดตามสภาพของโบราณสถาน และในกรณีของวัดกระเจี๊วได้ทำการเจาะผังหมุดอ้างอิงไว้สำหรับการตรวจสอบมุมเอียงที่อาจเปลี่ยนไปในอนาคต ซึ่งเป็นกรนำเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติมาใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินสภาพของโบราณสถานและสามารถวางแผนการบูรณะได้อย่างเหมาะสม

2.3 การทดสอบสมบัติอิฐโบราณ

เพื่อเป็นการประเมินว่ากำลังของวัสดุเพียงพอที่จะทำให้โครงสร้างมีเสถียรภาพ คณะผู้วิจัยจึงได้รวบรวมข้อมูลและทำการทดสอบสมบัติของตัวอย่างอิฐโบราณที่ได้รับการสนับสนุนจากกรุงเทพมหานครผ่านโครงการอนุรักษ์ป้อมมหากาฬ จากรายงานวิจัยในอดีตแสดงให้เห็นว่าสมบัติของอิฐโบราณมีความแปรปรวนสูง เพื่อให้การประเมินสภาพโครงสร้างสอดคล้องตามความเป็นจริงมากที่สุดจึงควรทำการทดสอบและรวบรวมข้อมูลสมบัติของวัสดุสำหรับโบราณสถานแต่ละแห่งเพื่อประกอบการตัดสินใจเลือก

วิธีการและวัสดุเพื่อการอนุรักษ์ โดยข้อมูลสมบัติของวัสดุป้อมมหากาฬนั้นยังไม่พบว่ามีการรายงานสมบัติทางวิศวกรรมไว้อย่างเป็นทางการ ส่วนสมบัติของอิฐโบราณจากแหล่งที่มาต่าง ๆ ในประเทศไทยบางส่วนได้มีการรายงานผ่านงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น

สุดชาย พานสุวรรณ [7] ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพของอิฐโบราณจากจังหวัดอยุธยาที่ช่วงอายุตั้งแต่ 1 ถึง 410 ปี และอิฐจากโรงงานที่ยังผลิตอยู่ในปัจจุบัน จากผลการทดสอบพบว่าค่าความหนาแน่นและค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐตัวอย่างทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันระหว่าง 1.322 ถึง 1.475 ก./ซม.³ และ 40.1 – 46.1 กก./ซม.² ตามลำดับ

สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์ และคณะ [6] ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพของอิฐและมอร์ตาร์โบราณจากโบราณสถานสำคัญบางแห่งในกรุงเทพมหานคร และจังหวัดพระนครศรีอยุธยา พบว่าค่าความหนาแน่นและค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าแตกต่างกันตามแหล่งที่มาโดยค่าความหนาแน่นของอิฐโบราณมีค่าอยู่ในช่วง 1.396 – 1.855 ก./ซม.³ และค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าอยู่ในช่วง 22.0 – 37.0 กก./ซม.² ขณะที่มอร์ตาร์โบราณมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.284 – 1.639 ก./ซม.³ ส่วนกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์จะมีค่าในช่วง 19.0 – 27.0 กก./ซม.² และได้สร้างสมการสำหรับการประมาณค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐก่อกับกำลังรับแรงอัดของอิฐ

2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการเชิงตัวเลขสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีความซับซ้อน การสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้น ณ ตำแหน่งต่างๆ ค่าการเสียรูปโครงสร้าง รวมถึงตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดเพื่อใช้ในการประเมินเสถียรภาพของโครงสร้างโบราณสถานได้ใกล้เคียงความเป็นจริง ดังนั้นการสร้างแบบจำลองและใช้สมมุติฐานสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกต้องเหมาะสมจึงมีความจำเป็นและยังคงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมอย่างต่อเนื่อง โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สมัยใหม่ร่วมกับเทคโนโลยีทางวิศวกรรมยุคใหม่อื่นๆ ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์โครงสร้างโบราณสถานของไทยในรอบ 5 ปีที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

สุนิสา มั่นคง และ ภาณุวัฒน์ สุริยฉัตร [8] วิเคราะห์ความเค้นเฉือนและค่าการทรุดตัวของกำแพงพระนครด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้แบบจำลองสองมิติที่มีความเครียดในระนาบ โดยอ้างอิงขนาดมิติของแบบจำลองจากการขุดสำรวจ ในการศึกษาได้ทำการจำลองและวิเคราะห์ผลกระทบต่อดินเหนียวอ่อนในแต่ละชั้นตอนการก่อสร้างของฐานรากแบบถมในแต่ละชั้นและทำการเปรียบเทียบในกรณีที่ใช้เสาเข็มไม้เสาและไม้ใช้ในการก่อสร้างพบว่าการใช้เสาเข็มไม้เสาในการก่อสร้างจะช่วยให้ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในดินเหนียวอ่อนมีค่าไม่เกินกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อน และกำแพงพระนครมีค่าการทรุดตัวในแนวตั้งและแนวราบสูงสุดเท่ากับ 0.10 และ 0.03 เมตรตามลำดับ

Wethyavivorn และคณะ [9] ได้ทำการวิเคราะห์ความเค้นของเจดีย์ทรงระฆังและทรงปราสาท จากการวิเคราะห์พบว่าความเค้นอัดและความเค้นดึงสูงเกิดขึ้นบริเวณจุดต่อระหว่างซุ้มประตูกับองค์เจดีย์ นอกจากนี้ยังทราบถึงตำแหน่งที่มีความเสี่ยงในการเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงดึงและสามารถทำ

การซ่อมแซมได้ ซึ่งเป็นการรักษาโบราณสถานให้มีสภาพสมบูรณ์และยืดอายุของโบราณสถาน

ภคพงศ์ ภัทราคม [10] ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV) เก็บข้อมูลภาพโบราณสถานและสร้างแบบจำลอง 3 มิติเพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างพระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคลซึ่งเป็นโครงสร้างก่ออิฐโบราณภายใต้แรงสถิตยศาสตร์ในสภาพปัจจุบัน และในสมมติฐานที่เจดีย์มีการเอียงเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ผลพบว่าในสภาพปัจจุบันมีค่าของความเค้นอัดระหว่าง 1.0 – 3.0 กก./ซม.² และมีค่าของความเค้นดึงระหว่าง 0.024 – 0.402 กก./ซม.² และในสมมติฐานที่เจดีย์มีการเอียงเพิ่มขึ้น พบว่าความเค้นที่เกิดขึ้นมีลักษณะการกระจายตัวที่เปลี่ยนไป โดยที่ความเค้นอัดและความเค้นดึงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์ในสภาพปัจจุบัน

สุทัศน์ และคณะ [6] ประยุกต์ใช้เครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์เก็บข้อมูลสภาพโบราณสถานและสร้างแบบจำลอง 3 มิติสำหรับการวิเคราะห์โบราณสถาน 3 รูปแบบได้แก่ เสา เจดีย์ทรงระฆัง และเจดีย์ทรงปราสาทด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยพิจารณาถึงความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดและอัตราส่วนความปลอดภัยในแต่ละกรณีที่มีขนาดความกว้าง ความสูง และมุมเอียงของโบราณสถานที่แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนความเค้นสูงสุดที่มากขึ้นจะส่งผลให้โบราณสถานมีความปลอดภัยน้อยลงสำหรับโบราณสถานรูปแบบเสา และเจดีย์ทรงระฆัง ในขณะที่เจดีย์ทรงปราสาทจะมีความปลอดภัยมากขึ้นหากค่าอัตราส่วนความเค้นสูงสุดมีค่าน้อยลง และมุมเอียงที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้โครงสร้างมีความปลอดภัยน้อยลงสำหรับโบราณสถานทุกรูปแบบ โดยมุมเอียงวิกฤตมีค่าเท่ากับ 2 6 และ 10 องศาสำหรับโบราณสถานรูปแบบเสา เจดีย์ทรงระฆัง และเจดีย์ทรงปราสาทตามลำดับ

3. วิธีการศึกษา

ในการศึกษานี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติในการสำรวจเก็บข้อมูลสภาพปัจจุบันของป้อมมหากาฬ และใช้ข้อมูลดังกล่าวมาสร้างแบบจำลอง 3 มิติเพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจะแสดงตัวอย่างการประเมินความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างป้อมมหากาฬในมิติของการประเมินความเค้นที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างเทียบกับผลการทดสอบตัวอย่างวัสดุโบราณ ซึ่งวิธีการศึกษาสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ การสำรวจและจัดทำข้อมูลด้วยเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ การทดสอบตัวอย่างวัสดุโบราณ และการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 การสำรวจและจัดทำข้อมูลด้วยเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ

ในการจัดทำข้อมูลแบบจำลองกลุ่มจุด 3 มิติ ผู้ปฏิบัติงานต้องทำการลงพื้นที่เก็บข้อมูลภาคสนามก่อน จากนั้นจึงนำข้อมูลทั้งหมดไปประมวลผลผ่านกระบวนการทางคอมพิวเตอร์ ดังขั้นตอนต่อไปนี้

3.1.1 การลงพื้นที่ปฏิบัติงานภาคสนาม

รูปที่ 2 แสดงภาพการลงพื้นที่ปฏิบัติงานภาคสนามในบริเวณป้อมมหากาฬ โดยใช้เครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติรุ่น Faro X 330 ในการเก็บข้อมูล โดยคณะผู้วิจัยได้ลงพื้นที่เก็บข้อมูลในช่วงเดือนเมษายน พ.ศ.2562 และทำ

การกำหนดค่าความละเอียดและคุณภาพในการสแกนของเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติไว้ที่ 1/5 และ 4x ตามลำดับ ซึ่งทำให้ได้ปริมาณข้อมูลในแต่ละตำแหน่ง การตั้งเครื่องมือจำนวน 28.4 ล้านจุด [3]



รูปที่ 2 ภาพการปฏิบัติงานภาคสนาม

3.1.2 การประมวลผลข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ

ข้อมูลที่ได้จากการปฏิบัติงานภาคสนามจะถูกนำมาประมวลผลเป็นข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติของป้อมมหากาฬโดยอาศัยการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ความเร็วสูง ก่อนจะนำข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติไปทำการวิเคราะห์ขนาดมิติและค่าระดับของป้อมมหากาฬด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เฉพาะทาง และอาศัยข้อมูลดังกล่าวมาสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในลำดับถัดไป

3.2 การทดสอบตัวอย่างวัสดุโบราณ

สำหรับการทดสอบวัสดุซึ่งเป็นอิฐก่อโบราณจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่การทดสอบความหนาแน่นและความพรุน และการทดสอบกำลังรับแรงอัด

3.2.2 การทดสอบความหนาแน่นและความพรุนของวัสดุ

ขั้นแรกทำการอบร้อนวัสดุให้อยู่ในสถานะแห้งแล้วทำการชั่งน้ำหนักต่อไปนำวัสดุไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้วัสดุอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำแล้วทำการชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำวัสดุไปชั่งน้ำหนักในน้ำดังรูปที่ 3 สุดท้ายจะสามารถคำนวณหาปริมาตรได้โดยอาศัยสมการที่ (1) และหาความพรุน (Porosity) ได้โดยอาศัยสมการที่ (2)

$$V = W_{sat} - W_{water} \quad (1)$$

$$Porosity (\%) = \frac{W_{sat} - W_{dry}}{V} \times 100 \quad (2)$$

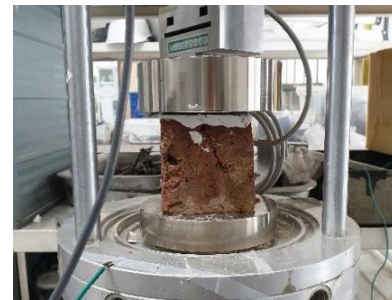
โดย V คือปริมาตรของวัสดุทดสอบ (ซม.³), W_{dry} คือน้ำหนักที่ชั่งบนอากาศโดยที่วัสดุอยู่ในสภาวะแห้ง (ก.), W_{water} คือน้ำหนักที่ชั่งในน้ำโดยที่วัสดุอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (ก.) และ W_{sat} คือน้ำหนักที่ชั่งบนอากาศโดยที่วัสดุอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (ก.)



รูปที่ 3 การชั่งน้ำหนักวัสดุทดสอบในน้ำ

3.2.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุ

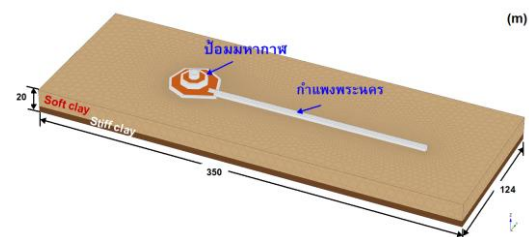
เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการทดสอบเป็นอิฐโบราณที่มีรูปลักษณะไม่สมบูรณ์ จึงทำการตัดแต่งตัวอย่างให้เป็นรูปแบบลูกบาศก์ที่มีขนาดความยาวด้านประมาณ 5-8 ซม. จากนั้นทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดดังรูปที่ 4 โดยกำหนดอัตราเร็วในการทดสอบเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุ

3.3 การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในส่วนนี้จะทำการวิเคราะห์ผลความเค้นที่เกิดขึ้นในป้อมมหากาฬเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร ในเบื้องต้นได้สร้างแบบจำลองและทำการวิเคราะห์ผลไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Plaxis 3D โดยอ้างอิงขนาดมิติของแบบจำลองจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติในหัวข้อที่ 3.1.2 โดยภาพรวมของแบบจำลองมีลักษณะดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ค่าพารามิเตอร์สำหรับชั้นดินซึ่งได้จากการสอบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของดินตัวอย่างที่ทำการเจาะสำรวจในบริเวณใกล้เคียง

ป้อมมหากาฬ และค่าพารามิเตอร์สำหรับโครงสร้างป้อมมหากาฬและกำแพงพระนครอ้างอิงจากข้อมูลในการศึกษาอื่น ๆ [6-7]

3.3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับชั้นดิน

ในเบื้องต้นได้ทำการแบ่งชั้นดินออกเป็น 2 ชั้น ได้แก่ชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) และชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) และกำหนดแบบจำลองเป็น Hardening soil model with small strain โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับชั้นดิน

ชนิด	E_{eod} (กิโล ปาสคาล)	E_{50} (กิโล ปาสคาล)	E_{ur} (กิโล ปาสคาล)	G_0 (กิโล ปาสคาล)	$\gamma_{0.7}$
ชั้นดิน เหนียว อ่อน	2790	2790	8370	16416	10^{-4}
	m	p_{ref} (กิโล ปาสคาล)	C (กิโล ปาสคาล)	ϕ (°)	v
	1	45	9.1	20.6	0.3
ชนิด	E_{eod} (กิโล ปาสคาล)	E_{50} (กิโล ปาสคาล)	E_{ur} (กิโล ปาสคาล)	G_0 (กิโล ปาสคาล)	$\gamma_{0.7}$
ชั้นดิน เหนียว แข็ง	16000	16000	48000	164900	10^{-4}
	m	p_{ref} (กิโล ปาสคาล)	C (กิโล ปาสคาล)	ϕ (°)	v
	1	150	20.5	24.8	0.3

3.3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับโครงสร้างป้อมมหากาฬ

ประกอบด้วยโครงสร้างหลักคือกำแพงของป้อมมหากาฬและกำแพงพระนครซึ่งเป็นอิฐโบราณ ชั้นอิฐรองฐานป้อมมหากาฬ และวัสดุถมที่บรรจุอยู่ใต้พื้นของป้อมมหากาฬแต่ละชั้น ภายในชั้นกำแพงของป้อมมหากาฬทั้งหมดถูกกำหนดแบบจำลองเป็น Linear Elastic Model โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับโครงสร้างป้อมมหากาฬ

โครงสร้าง	γ (กิโลนิวตัน/ ม. ³)	E (กิโลปาสคาล)	v
กำแพง	15	343,210	0.21
ชั้นฐานอิฐรองใต้ป้อม มหากาฬ	16	300,000	0.21
ชั้นฐานอิฐรองใต้กำแพง พระนครและวัสดุถม	16	100,000	0.21

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ

ข้อมูลดิจิทัลจากการสำรวจจำนวนมากจะนำมาประมวลผลเป็นข้อมูลกลุ่มจุดพิกัด 3 มิติที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ขนาดมิติและค่าระดับพื้นได้ โดยสามารถสรุปผลการวิเคราะห์พอสังเขปได้ดังต่อไปนี้

4.1.1 ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติของป้อมมหากาฬและกำแพงพระนคร

ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติที่ทำการประมวลผลแล้ว มีลักษณะดังรูปที่ 6 และ 7 โดยกำหนดจุดอ้างอิงพิกัด (0,0) ไว้ที่พื้นบริเวณประตูทางเข้าป้อมมหากาฬ แสดงตำแหน่งดังรูปที่ 8



รูปที่ 6 ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติในมุมมองสูง



รูปที่ 7 ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติบริเวณป้อมมหากาฬ

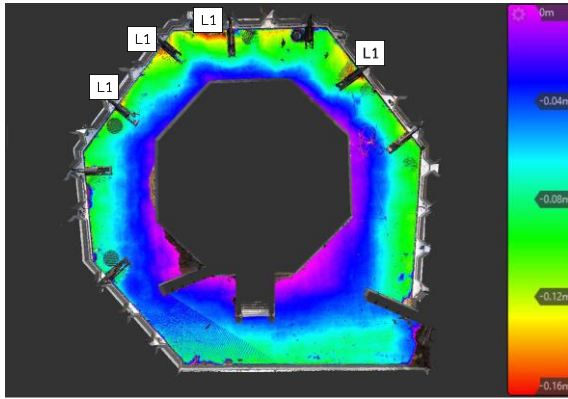


รูปที่ 8 ตำแหน่งจุดอ้างอิงพิกัด (0,0)

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับพื้นป้อมมหากาฬ

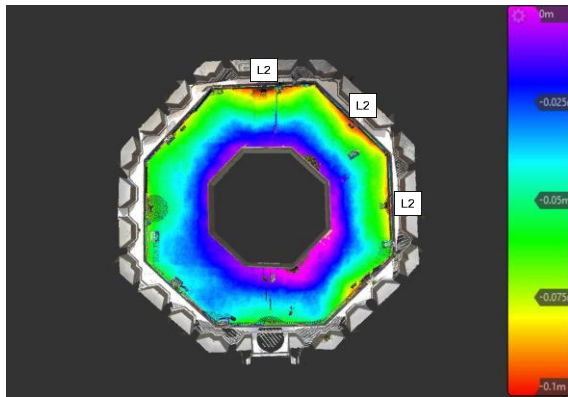
ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าระดับพื้นป้อมมหากาฬ จะแบ่งการวิเคราะห์ค่าระดับออกเป็นแต่ละชั้นพื้นชั้น 1 และพื้นชั้น 2

รูปที่ 9 แสดงค่าระดับความสูงของพื้นป้อมมหากาฬชั้นที่ 1 จำแนกด้วยระดับสีที่แตกต่างกัน มีค่าความแตกต่างของระดับพื้นสูงสุดเท่ากับ 16 ซม. โดยตัวอักษร L1 แสดงถึงตำแหน่งที่มีค่าระดับต่ำที่สุด



รูปที่ 9 กราฟฟิกค่าระดับพื้นที่ชั้นที่ 1 ของป้อมมหากาฬ

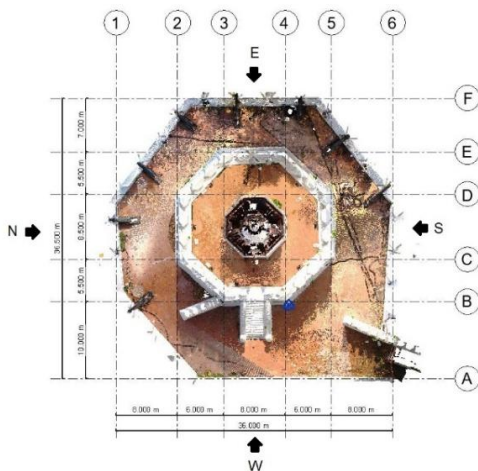
รูปที่ 10 แสดงค่าระดับความสูงของพื้นป้อมมหากาฬชั้นที่ 2 จำแนกด้วยระดับสีที่แตกต่างกัน มีค่าความแตกต่างของระดับพื้นสูงสุดเท่ากับ 10 ซม. โดยตัวอักษร L2 แสดงถึงตำแหน่งที่มีค่าระดับต่ำที่สุด



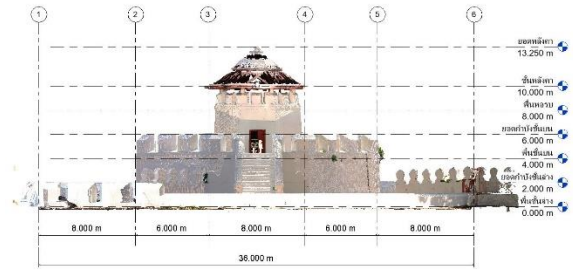
รูปที่ 10 กราฟฟิกค่าระดับพื้นที่ชั้นที่ 2 ของป้อมมหากาฬ

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดมิติป้อมมหากาฬและกำแพงพระนคร

รูปที่ 11 และ 12 แสดงผังบริเวณป้อมมหากาฬและรูปด้านพร้อมเส้นกริดแบ่งระยะและเส้นระดับชั้นความสูง

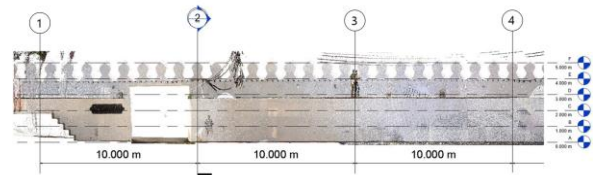


รูปที่ 11 ผังบริเวณและเส้นกริดเบื้องต้นของป้อมมหากาฬ



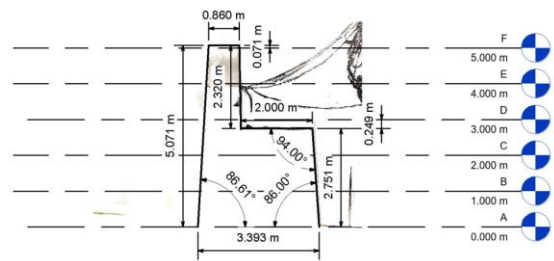
รูปที่ 12 รูปด้านทิศตะวันตกของป้อมมหากาฬ

รูปที่ 13 แสดงรูปด้านของกำแพงพระนครส่วนที่ติดกับป้อมมหากาฬ พร้อมเส้นกริดแบ่งระยะและเส้นระดับชั้นความสูง



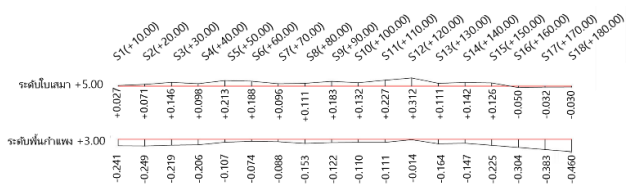
รูปที่ 13 รูปด้านของกำแพงพระนครส่วนที่ติดกับป้อมมหากาฬ

รูปที่ 14 แสดงรูปตัดขวางของกำแพงพระนครในตำแหน่งเส้นกริดที่ 2 พร้อมเส้นแสดงรูปร่างและขนาดมิติของกำแพงพระนคร โดยระดับพื้นกำแพงมีระดับต่ำกว่าเส้นระดับ +3.00 ม. เท่ากับ 25 ซม. และมีระดับของใบเสมาสูงกว่าเส้นระดับ +5.00 ม. เท่ากับ 7 ซม.



รูปที่ 14 รูปตัดขวางของกำแพงพระนครตำแหน่งเส้นกริดที่ 2

เมื่อพิจารณาค่าระดับในระดับของใบเสมาและระดับพื้นของกำแพงพระนครจากรูปตัดขวางแล้วจึงนำค่าระดับของกำแพงพระนครที่ตำแหน่งต่าง ๆ มาระบุเส้นแนวโน้มค่าระดับของกำแพงพระนครได้ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 เส้นแนวโน้มค่าระดับของแนวกำแพงพระนครที่ตำแหน่งเส้นกริดต่าง ๆ

โดยที่ค่าความแตกต่างของระดับพื้นกำแพงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 45 ซม. และค่าความแตกต่างของระดับใบเสมาสูงสุดมีค่าเท่ากับ 39 ซม.

4.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของวัสดุ

4.2.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นของวัสดุและความพรุน

จากตารางที่ 3 แสดงค่าความหนาแน่นของอิฐโบราณในสถานะแห้งและสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ และค่าความพรุน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.44 ก./ซม.³ 1.72 ก./ซม.³ และ 27.70 % ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความหนาแน่นของวัสดุและความพรุน

ตัวอย่าง	ความหนาแน่นในสถานะแห้ง (ก./ซม. ³)	ความหนาแน่นในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ (ก./ซม. ³)	ความพรุน (%)
1	1.55	1.89	33.74
2	1.52	1.85	33.38
3	1.45	1.71	26.63
4	1.36	1.60	23.82
5	1.36	1.60	24.16
6	1.42	1.68	25.86
7	1.42	1.68	26.29

4.2.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุรูปแบบลูกบาศก์

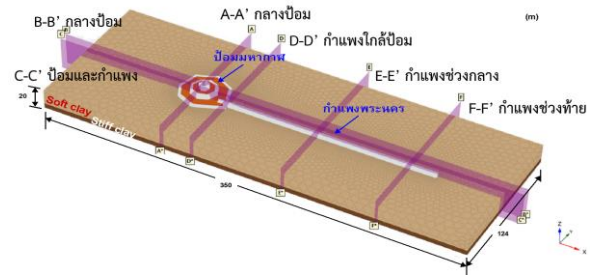
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างวัสดุอิฐโบราณของป้อมมหากาฬสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4 โดยค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 39.10 กก./ซม.²

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุรูปแบบลูกบาศก์

ตัวอย่าง	ความยาวด้าน (ซม.)	น้ำหนัก (ก.)	แรงอัดสูงสุด (กก.)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)
1	7.3x7.5x6.4	543.64	2485.95	45.40
2	7.3x7.3x7.8	608.55	1180.36	22.15
3	7.9x8.2x7.7	722.44	2380.49	36.74
4	8.0x8.8x8.1	691.15	4214.23	59.86
5	7.7x9.2x8.2	718.58	2227.22	31.44

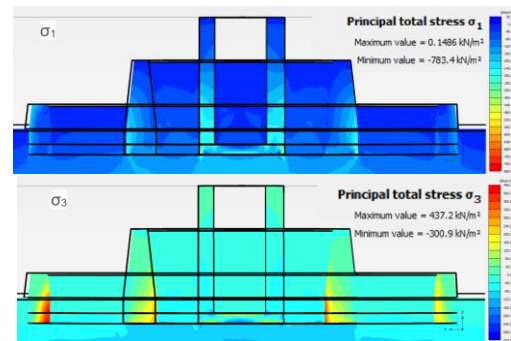
4.3 ผลการวิเคราะห์ความเค้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการประเมินความเค้นสูงสุดและต่ำสุดในทิศทางความเค้นหลักที่เกิดขึ้นภายในป้อมมหากาฬและกำแพงพระนคร ได้พิจารณาผลความเค้นในตำแหน่งต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 16

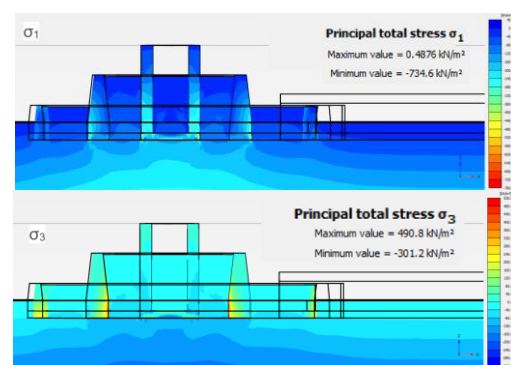


รูปที่ 16 การวิเคราะห์ความเค้นในตำแหน่งต่าง ๆ

จากผลการวิเคราะห์ในส่วนของป้อมมหากาฬในตำแหน่ง A-A' และ B-B' ดังรูปที่ 17 และ 18 พบว่ามีความเค้นอัดสูงสุดเกิดขึ้นในตำแหน่ง A-A' บริเวณโคนกำแพงชั้นในสุด และมีความเค้นดึงสูงสุดเกิดขึ้นในตำแหน่ง B-B' บริเวณโครงสร้างฐานรากของป้อมมหากาฬ มีค่าเท่ากับ 783.4 กิโลปาสคาล (7.49 กก./ซม.²) และ 490.8 กิโลปาสคาล (5.00 กก./ซม.²) ตามลำดับ

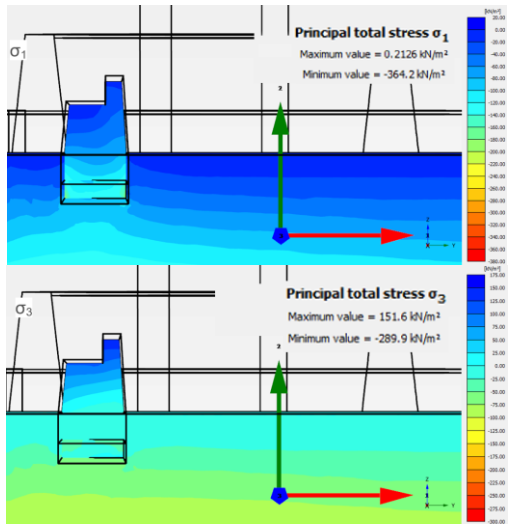


รูปที่ 17 กราฟฟิกความเค้นในทิศทางความเค้นหลักในตำแหน่ง A-A'



รูปที่ 18 กราฟฟิกความเค้นในทิศทางความเค้นหลักในตำแหน่ง B-B'

จากผลการวิเคราะห์ในส่วนของกำแพงพระนคร พบว่ามีความเค้นอัดและความเค้นดึงสูงสุดเกิดขึ้นในตำแหน่ง D-D' มีค่าเท่ากับ 364.2 กิโลปาสคาล (3.71 กก./ซม.²) และ 151.6 กิโลปาสคาล (1.54 กก./ซม.²) ในบริเวณขอบฐานรากใต้ดินและฝายยอดของกำแพงพระนครตามลำดับแสดงดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 กราฟฟิกความเค้นในทิศทางความเค้นหลักในตำแหน่ง D-D'

กำลังรับแรงอัดของอิฐก่อสามารถประมาณได้จากกำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบลูกบาศก์ที่มีค่าประมาณ 60 % ของกำลังรับแรงอัดของอิฐรูปแบบลูกบาศก์ [6] และกำลังรับแรงดึงได้จากการประมาณโดยอ้างอิงจากข้อมูลในการศึกษาอื่น ๆ พบว่าค่ากำลังรับแรงดึงมีค่าประมาณ 8 % ของกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อ [9] ดังนั้นค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดึงของอิฐก่อที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลนี้มีค่าเท่ากับ 23.46 กก./ซม.² และ 1.88 กก./ซม.² ตามลำดับ

เมื่อนำค่าความเค้นอัดและดึงสูงสุดจากการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาเทียบกับกำลังของวัสดุแล้วพบว่ามีความอดรับความปลอดภัยในการรับแรงอัดและดึงเท่ากับ 3.13 และ 0.38 ตามลำดับสำหรับโครงสร้างป้อมมหากาฬ และมีค่าเท่ากับ 6.32 และ 1.22 ตามลำดับสำหรับโครงสร้างกำแพงพระนคร จะพบว่าค่าความเค้นดึงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างมีค่าเกินกว่ากำลังรับแรงดึงของอิฐก่อในบริเวณโครงสร้างฐานรากของป้อมมหากาฬ

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เครื่องสแกนวัด 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ในการจัดทำข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติของป้อมมหากาฬสำหรับการประเมินและติดตามสภาพของป้อมมหากาฬ จากการศึกษาที่มีข้อสรุปดังนี้

ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติสามารถประยุกต์ใช้ในการจัดทำผังบริเวณ รูปด้าน รูปตัด ของป้อมมหากาฬ และสามารถวัดขนาดมิติส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้างได้อย่างแม่นยำแม้ในจุดที่ทำการวัดจริงได้ยาก รวมถึงสามารถประเมินความหนาตลอดจนการทรุดเอียงของกำแพงพระนครได้อย่างครบถ้วน ผลการวิเคราะห์ระดับพื้นป้อมมหากาฬแสดงได้ถึงตำแหน่งที่มีค่าระดับต่ำสุดอย่างชัดเจนในแต่ละชั้น และผลการวิเคราะห์ค่าระดับพื้นกำแพงพระนครแสดงถึงแนวโน้มการโก่งหรือทรุดตัวของแนวกำแพงพระนครที่มีความยาวมาก

ในส่วนการทดสอบอิฐโบราณมีผลสรุปดังนี้ ค่าความหนาแน่นของอิฐโบราณในสภาวะแห้ง สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ และค่าความพรุน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.44 ก./ซม.³ 1.72 ก./ซม.³ และ 27.70 % ตามลำดับ และค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 39.10 กก./ซม.²

การวิเคราะห์ผลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงถึงค่าความเค้นอัดและดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างป้อมมหากาฬและกำแพงพระนครเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร โดยมีจุดเสี่ยงอยู่บริเวณโครงสร้างฐานรากของป้อมมหากาฬซึ่งมีค่าความเค้นดึงเกิดขึ้นเท่ากับ 5.00 กก./ซม.² และมีอัตราส่วนความปลอดภัยในการรับแรงดึงเท่ากับ 0.38 ซึ่งมีค่าเกินกำลังรับแรงดึงของอิฐก่อและอาจจะส่งผลให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างในบริเวณดังกล่าวอันอาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยให้กับโครงสร้างในบริเวณอื่นเพิ่มเติมได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และขอขอบคุณสำนักบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง และกองจัดรูปที่ดินและปรับปรุงฟื้นฟูเมือง สำนักผังเมือง กรุงเทพมหานคร สำหรับการอนุเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ ของป้อมมหากาฬที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักการวางผังและพัฒนาเมือง กรุงเทพมหานคร (2562). รายงานการสำรวจป้อมมหากาฬ. *โครงการปรับปรุงป้อมมหากาฬและกำแพงเมืองเก่า*, สำนักการวางผังและพัฒนาเมือง กรุงเทพมหานคร.
- [2] Ebrahim, M., (2011). *3D Laser Scanner: History, Applications and Future*. Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Assiut University, pp.29-30.
- [3] FARO Technologies, Inc., (2015). *FARO Laser Scanner Focus3D X 330 Manual*. FARO Technologies, Inc, Lake Mary, FL, USA., pp.42-45.
- [4] Kwoczynska, B., Piech, I., Sledz, Z., Litwin, U., Obirek, P. (2016). The Use of Terrestrial Laser Scanning in Surveying Historic Buildings. *2016 Baltic Geodetic Congress*, Gdansk University of Technology, Poland, 2-4 June 2016, pp.263-268.
- [5] Klapa, P., Mitka, B., Zygmunt, M. (2017). Application of Integrated Photogrammetric and Terrestrial Laser Scanning Data to Cultural Heritage Surveying. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 95.
- [6] สุทัศน์ ลิลาทวิวัฒน์, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัยณรงค์ อธิสกุล, รักติพงษ์ สหมิตรมงคล และ เสน่ห์ มหาผล (2562). *โครงการพัฒนาฐานข้อมูลทางวิศวกรรมเพื่อการประเมินและติดตามสภาพโครงสร้างโบราณสถานของไทย*. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, หน้า 29-141.

- [7] สุดชาย พานสุวรรณ (2543), *การวิเคราะห์โบราณสถานก่ออิฐในเชิงวิศวกรรม*. วิทยานิพนธ์ปริญญา, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [8] สุนิสา มั่นคง และ ภาณุวัฒน์ สุริยฉัตร (2550), *กำแพงพระนคร: องค์ความรู้ของคนไทยยุคต้นรัตนโกสินทร์*. *วารสารศิลปากร*, ปีที่ 50, ฉบับที่ 4, หน้า 32-49.
- [9] Wethyavivorn, B., Surit, S., Apichatyakul, C., Lertsivanon, N. (2016). Model Verification of Thai Historic Masonry Monuments. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30, p.04014188.
- [10] ภคพงศ์ ภัทราคม (2561), *บูรณาการการสำรวจลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างและประเมินความมั่นคงโครงสร้างโบราณสถาน : กรณีศึกษาพระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล*. ดุษฎีนิพนธ์, สาขาวิศวกรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.