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 มหาสุวรรณชัย[2] ก้องภพ วัชรเสวี[3] ชัยณรงค์ อธิสกุล[4] พรเกษม จงประดิษฐ์[5] และ สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์[6]

[1,2,3,4,5,6]

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการจัดทำข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติร่วมกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการอนุรักษ์ป้อมก่ออิฐโบราณของไทย โดยอาศัยป้อมมหากาฬเป็นกรณีศึกษา ข้อมูลดิจิทัลจำนวนมากของป้อมจะได้รับการจัดเก็บผ่านเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติแบบภาคพื้นดิน ข้อมูลที่ได้มาทั้งหมดจะนำไปประมวลผลเป็นแบบจำลองกลุ่มจุดพิกัด 3 มิติของป้อม โดยงานวิจัยนี้จะนำเสนอขนาดมิติและค่าระดับในสภาวะปัจจุบันตามทิศทางหลักของป้อมมหากาฬ นอกจากนี้จะนำตัวอย่างวัสดุก่อโบราณในตำแหน่งต่างๆของป้อมมาทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบหาค่าความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของวัสดุก่อ จากนั้นจะอาศัยข้อมูลกลุ่มจุดพิกัด 3 มิติมาพัฒนาเป็นแบบจำลองสมมุติฐานซึ่งจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ แผนภาพแสดงการกระจายความเค้นในตำแหน่งต่างๆจะจัดทำขึ้นเพื่อระบุบริเวณที่จะเกิดค่าความเค้นสูงสุดทั้งในด้านที่เป็นแรงอัดและในด้านที่เป็นแรงดึง ผลการประเมินการเสียรูปของป้อมอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรจะนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลกลุ่มจุด 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 โดยภายนอกเป็นป้อมปราการรูปทรงแปดเหลี่ยมซ้อนกันสองชั้นเชื่อมถึงกันด้วยบันไดและชั้นที่สามเป็นหอรบ ประตูหอรบเป็นประตูบานไม้เล่นสีแดงน้ำหมาก หลังคาทรงจั่ว และภายในปูพื้นด้วยกระเบื้องดินเผา ความสูงจากพื้นดินถึงหลังคาหอรบประมาณ 15 เมตร ตัวป้อมปราการเชื่อมต่อกับกำแพงเมืองพระนครยาว 180 เมตร กำแพงทั้งหมดมีเชิงเทินลักษณะเป็นใบเสมา ที่กล่าวมาข้างต้นล้วนเป็นสถาปัตยกรรมที่มีเอกลักษณ์และหาชมได้

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



รูปที่ 1 ป้อมมหากาฬในปัจจุบัน [1]

โครงสร้างของป้อมมหากาฬในส่วนของกำแพงเป็นโครงสร้างก่ออิฐฉาบปูนที่มีความหนา ส่วนของฐานรากของกำแพงป้อมมหากาฬมีการใช้อิฐก้อนหักครึ่ง เศษอิฐขนาดเล็ก เศษปูน มาถมเป็นชั้น ๆ ที่มีความหนาต่างกันไป โดยรวมแล้วฐานรากมีความหนาประมาณ 1.5 เมตร [1] ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากภาพลักษณ์โดยรวมแล้วจะเห็นว่าป้อมมหากาฬมีลักษณะมั่นคงแข็งแรงและดูโดดเด่นสวยงามมาจนถึงปัจจุบัน

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

การนำเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติซึ่งเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงมาใช้ในการจัดทำข้อมูลสภาพปัจจุบันของป้อมมหากาฬในครั้งนี้นอกจากจะใช้ประกอบการประเมินสภาพทางวิศวกรรมเพื่อการอนุรักษ์ในปัจจุบันแล้ว ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้ยังเป็นประโยชน์ในระยะยาวในด้านการศึกษาทางโบราณคดี สถาปัตยกรรม และวิศวกรรม ตลอดจนเป็นข้อมูลสำหรับการประเมินและติดตามสภาพโครงสร้างป้อมมหากาฬเพื่อการอนุรักษ์ในอนาคตอีกด้วย อันจะทำให้คนรุ่นใหม่ได้มีโอกาสรับรู้คุณค่าของโบราณสถานซึ่งเป็นสิ่งที่สะท้อนให้เห็นถึงประวัติศาสตร์และวัฒนธรรมที่สำคัญของประเทศไทย

2. การศึกษาที่เกี่ยวข้อง

2.1

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

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

2.2

ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติซึ่งประกอบไปด้วยตำแหน่งพิกัดจำนวนมากของวัตถุ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินสภาพหรือวิเคราะห์ขนาดมิติได้โดยอาศัยซอฟแวร์เฉพาะทางต่าง ๆ ซึ่งในเบื้องต้นได้มีผู้ศึกษาถึงวิธีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสแกนวัตถุ 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 และในกรณีของวัดกระจีได้ทำการเจาะฝังหมุดอ้างอิงไว้สำหรับการตรวจสอบมุมเอียงที่อาจเปลี่ยนไปในอนาคต ซึ่งเป็นการนำเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติมาใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินสภาพของโบราณสถานและสามารถวางแผนการบูรณะได้อย่างเหมาะสม

2.3

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} ส่วนกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าจะมีค่าในช่วง 19.0 - 27.0 กก./ซม.^{2} และได้สร้างสมการสำหรับการประมาณกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อด้วยกำลังรับแรงอัดของอิฐ

2.4

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการเชิงตัวเลขสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีความซับซ้อน การสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้น ณ ตำแหน่งต่างๆ ค่าการเสียรูปโครงสร้าง รวมถึงตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดเพื่อใช้ในการประเมินเสถียรภาพของโครงสร้างโบราณสถานได้ใกล้เคียงความเป็นจริง ดังนั้นการสร้างแบบจำลองและใช้สมมุติฐานสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกต้องเหมาะสมจึงมีความจำเป็นและยังคงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมอย่างต่อเนื่อง โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สมัยใหม่ร่วมกับเทคโนโลยีทางวิศวกรรมยุคใหม่อื่นๆ ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์โครงสร้างโบราณสถานของไทยในรอบ 5 ปีที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

สุนิสา มั่นคง และ ภาณุวัฒน์ สุริยฉัตร [8] วิเคราะห์ความเค้นเฉือนและค่าการทรุดตัวของกำแพงพระนครด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้แบบจำลองสองมิติกรณีความเครียดในระนาบ โดยอ้างอิงขนาดมิติของแบบจำลองจากการขุดสำรวจ ในการศึกษาได้ทำการจำลองและวิเคราะห์ผลกระทบต่อดินเหนียวอ่อนในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของฐานรากแบบถมในแต่ละชั้นและทำการเปรียบเทียบในกรณีที่ใช้เสาเข็มไม้เสลาและไม่ใช้ในการก่อสร้าง พบว่าการใช้เสาเข็มไม้เสลาในการก่อสร้างจะช่วยให้ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในดินเหนียวอ่อนมีค่าไม่เกินกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อน และกำแพงพระนครมีค่าการทรุดตัวในแนวดิ่งและแนวราบสูงสุดเท่ากับ 0.10 และ 0.03 เมตรตามลำดับ

Wethyavivorn และคณะ [9] ได้ทำการวิเคราะห์ความเค้นของเจดีย์ทรงระฆังและทรงปรางค์ จากการวิเคราะห์พบว่าความเค้นอัดและความเค้นดึงสูงเกิดขึ้นบริเวณจุดต่อระหว่างซุ้มประตูกับองค์เจดีย์ นอกจากนี้ยังทราบถึงตำแหน่งที่มีความเสี่ยงในการเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงดึงและสามารถทำการซ่อมแซมได้ ซึ่งเป็นการรักษาโบราณสถานให้มีสภาพสมบูรณ์และยืดอายุของโบราณสถาน

ภคพงศ์ ภัทราคม [10] ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV) เก็บข้อมูลภาพโบราณสถามและสร้างแบบจำลอง 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 และเจดีย์ทรงปรางค์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยพิจารณาถึงความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดและอัตราส่วนความปลอดภัยในแต่ละกรณีที่มีขนาดความกว้าง ความสูง และมุมเอียงของโบราณสถานที่แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าค่าอัตราส่วนความชะลูดที่มากขึ้นจะส่งผลให้โบราณสถานมีความปลอดภัยน้อยลงสำหรับโบราณสถานรูปแบบเสา และเจดีย์ทรงระฆัง ในขณะที่เจดีย์ทรงปรางค์จะมีความปลอดภัยมากขึ้นหากค่าอัตราส่วนความชะลูดมีค่าน้อยลง และมุมเอียงที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้โครงสร้างมีความปลอดภัยน้อยลงสำหรับโบราณสถานทุกรูปแบบ โดยมุมเอียงวิกฤติมีค่าเท่ากับ 2 6 และ10 องศาสำหรับโบราณสถานรูปแบบเสา เจดีย์ทรงระฆัง และเจดีย์ทรงปรางค์ตามลำดับ

3. วิธีการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติในการสำรวจเก็บข้อมูลสภาพปัจจุบันของป้อมมหากาฬ และใช้ข้อมูลดังกล่าวมาสร้างแบบจำลอง 3 มิติเพื่อการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจะแสดงตัวอย่างการประเมินความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างป้อมมหากาฬในมิติของการประเมินความเค้นที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างเทียบกับผลการทดสอบตัวอย่างวัสดุโบราณ ซึ่งวิธีการศึกษาสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ การสำรวจและจัดทำข้อมูลด้วยเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ การทดสอบตัวอย่างวัสดุโบราณ และการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1

ในการจัดทำข้อมูลแบบจำลองกลุ่มจุด 3 มิติ ผู้ปฏิบัติงานต้องทำการลงพื้นที่เก็บข้อมูลภาคสนามก่อน จากนั้นจึงนำข้อมูลทั้งหมดไปประมวลผลผ่านกระบวนการทางคอมพิวเตอร์ ดังขั้นตอนต่อไปนี้

. .1

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

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



รูปที่ 2 ภาพการปฏิบัติงานภาคสนาม

ข้อมูลที่ได้จากการปฏิบัติงานภาคสนามจะถูกนำมาประมวลผลเป็นข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติของป้อมมหากาฬโดยอาศัยการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ความเร็วสูง ก่อนจะนำข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติไปทำการวิเคราะห์ขนาดมิติและค่าระดับของป้อมมหากาฬด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เฉพาะทาง และอาศัยข้อมูลดังกล่าวมาสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในลำดับถัดไป

3.2

สำหรับการทดสอบวัสดุซึ่งเป็นอิฐก่อโบราณจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่การทดสอบความหนาแน่นและความพรุน และการทดสอบกำลังรับแรงอัด

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

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

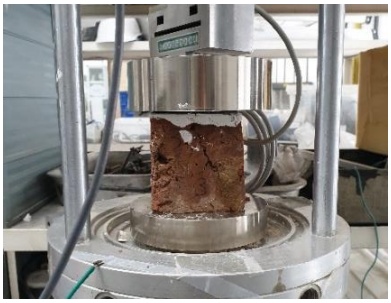
$$Porosity\ (\%) = \frac{W_{sat} - W_{dry}}{V} \times 100 \quad (2)$$

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



รูปที่ 3 การชั่งน้ำหนักวัสดุทดสอบในน้ำ

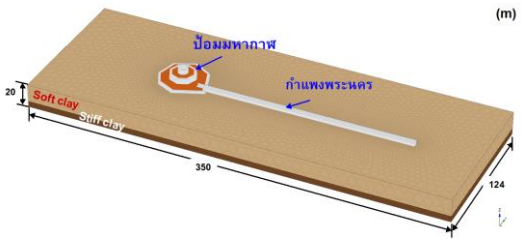
เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการทดสอบเป็นอิฐโบราณที่มีรูปลักษณะไม่สมบูรณ์ จึงทำการตัดแต่งตัวอย่างให้เป็นรูปแบบลูกบาศก์มีขนาดความยาวด้านประมาณ 5-8 ซม. จากนั้นทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดดังรูปที่ 4 โดยกำหนดอัตราเร็วในการทดสอบเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุ

3.3

ในส่วนนี้จะทำการวิเคราะห์ผลความเค้นที่เกิดขึ้นในป้อมมหากาฬเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร ในเบื้องต้นได้สร้างแบบจำลองและทำการวิเคราะห์ผลไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Plaxis 3D โดยอ้างอิงขนาดมิติของแบบจำลองจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติในหัวข้อที่ 3.1.2 โดยภาพรวมของแบบจำลองมีลักษณะดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

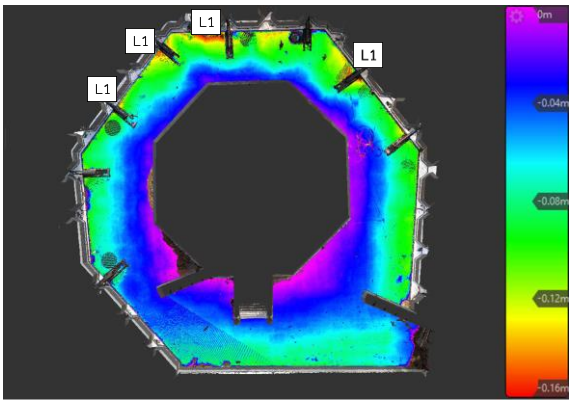
สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ค่าพารามิเตอร์สำหรับชั้นดินซึ่งได้จากการสอบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของดินตัวอย่างที่ทำการเจาะสำรวจในบริเวณใกล้เคียง

ป้อมมหากาฬ และค่าพารามิเตอร์สำหรับโครงสร้างป้อมมหากาฬและกำแพงพระนครอ้างอิงจากข้อมูลในการศึกษาอื่น ๆ [6-7]

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

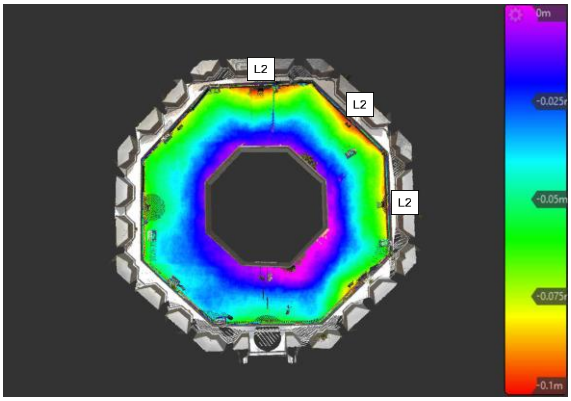
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับชั้นดิน

	E_{eod}
ชนิด	



รูปที่ 9 กราฟฟิกค่าระดับพื้นชั้นที่ 1 ของป้อมมหากาฬ

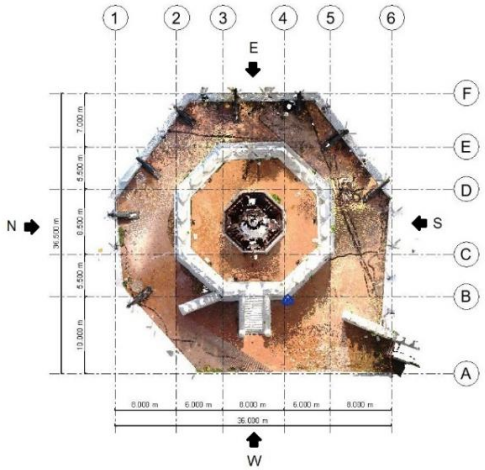
รูปที่ 10 แสดงค่าระดับความสูงของพื้นป้อมมหากาฬชั้นที่ 2 จำแนกด้วยระดับสีที่แตกต่างกัน มีค่าความแตกต่างของระดับพื้นสูงสุดเท่ากับ 10 ซม. โดยตัวอักษร L2 แสดงถึงตำแหน่งที่มีค่าระดับต่ำที่สุด



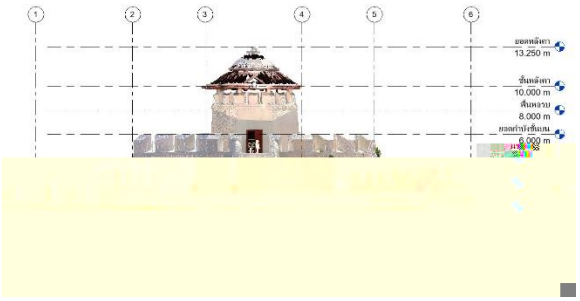
รูปที่ 10 กราฟฟิกค่าระดับพื้นชั้นที่ 2 ของป้อมมหากาฬ

4.1.

รูปที่ 11 และ 12 แสดงผังบริเวณป้อมมหากาฬและรูปด้านพร้อมเส้นกริดแบ่งระยะและเส้นระดับชั้นความสูง

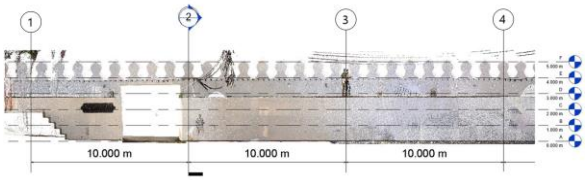


รูปที่ 11 ผังบริเวณและเส้นกริดเบื้องต้นของป้อมมหากาฬ



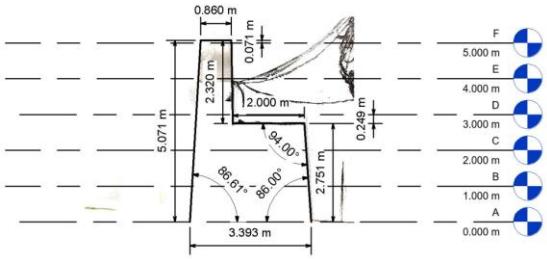
รูปที่ 12 รูปด้านทิศตะวันตกของป้อมมหากาฬ

รูปที่ 13 แสดงรูปด้านของกำแพงพระนครส่วนที่ติดกับป้อมมหากาฬพร้อมเส้นกริดแบ่งระยะและเส้นระดับชั้นความสูง



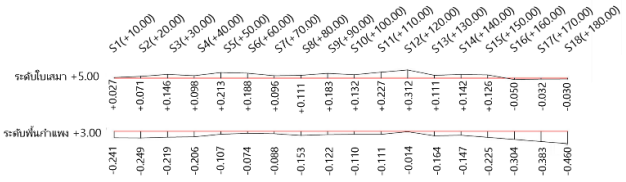
รูปที่ 13 รูปด้านของกำแพงพระนครส่วนที่ติดกับป้อมมหากาฬ

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. .1

จากตารางที่ 3 แสดงค่าความหนาแน่นของอิฐโบราณในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ และค่าความพรุน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.44 ก./ซม.^{3} 1.72 ก./ซม.^{3} และ 27.70 % ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความหนาแน่นของวัสดุและความพรุน

ตัวอย่าง	ความหนาแน่นในสภาวะแห้ง (ก./ซม.^{3})	ความหนาแน่นในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (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

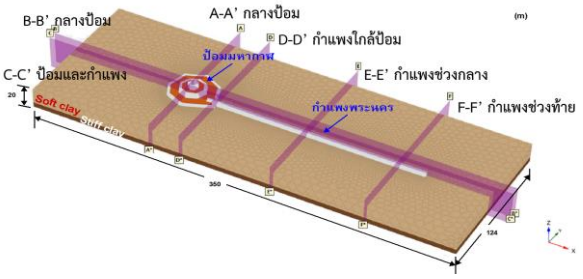
4. .

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างวัสดุอิฐโบราณของป้อมมหากาฬสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4 โดยค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐโบราณมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 39.10 กก./ซม.^{2}

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุรูปแบบลูกบาศก์

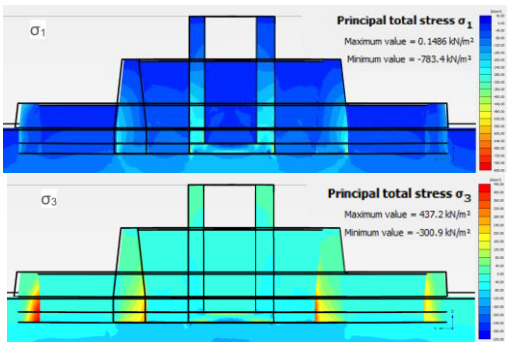
ตัวอย่าง	ความยาวด้าน (ซม.)	น้ำหนัก (ก.)	แรงอัดสูงสุด (กก.)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})
1	7.3x7.5x6.4	543.64	2485.95	45.40
2	7.3x7.3x7.8	608.55	1180.36	22.15
3	7.9x8.2x7.7	722.44	2380.49	36.74
4	8.0x8.8x8.1	691.15	4214.23	59.86
5	7.7x9.2x8.2	718.58	2227.22	31.44

ในการประเมินความเค้นสูงสุดและต่ำสุดในทิศทางความเค้นหลักที่เกิดขึ้นภายในป้อมมหากาฬและกำแพงพระนคร ได้พิจารณาผลความเค้นในตำแหน่งต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 16

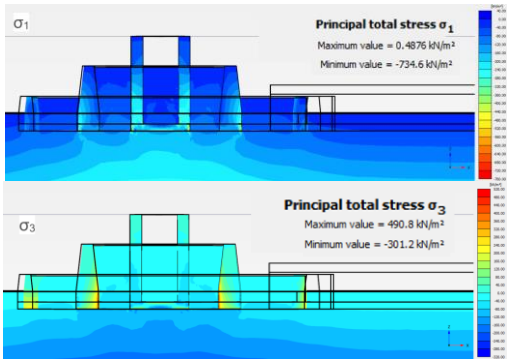


รูปที่ 16 การวิเคราะห์ความเค้นในตำแหน่งต่าง ๆ

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}) ในบริเวณขอบฐานรากใต้ดินและผิวยอดของกำแพงพระนครตามลำดับแสดงดังรูปที่ 19

[7] สุดชาย พานสุวรรณ (2543), . วิทยานิพนธ์ปริญญา, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[8] สุนิสา มั่นคง และ ภาณุวัฒน์ สุริยฉัตร (2550), กำแพงพระนคร: องค์ความรู้ของคนไทยยุคต้นรัตนโกสินทร์. , ปีที่ 50, ฉบับที่ 4, หน้า 32-49.

[9] Wethyavivorn, B., Surit, S., Apichatyakul, C., Lerdsivanon, N. (2016). Model Verification of Thai Historic Masonry Monuments. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30, p.04014188.

[10] ภคพงศ์ ภัทราคม (2561), . ดุษฎีนิพนธ์, สาขาวิศวกรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.