

ข้อมูลการสแกนวัตถุ 3 มิติและการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของ วัดพระราม 3D Laser Scanning Data and Finite Element Analysis of Wat Phra Ram

ฐานวัฒน์ จินานุสรณ์* พีรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย สุวัจน์ชัย แก้วมาคุณ ชัยณรงค์ อธิสกุล และ สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: thanawat.jina@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

วัดพระรามเป็นวัดที่สร้างขึ้นสมัยอยุธยาตอนต้น ซึ่งเป็นโบราณสถานที่มีชื่อเสียงแห่งหนึ่งในอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา เจดีย์องค์ประธานเป็นเจดีย์ทรงปราสาท โดยได้อิทธิพลมาจากเมืองละโว้ หรือเขมรโบราณ การทราบลักษณะทางกายภาพที่ชัดเจนร่วมกับองค์ความรู้เชิงลึกในพฤติกรรมของตัวโครงสร้างมีความสำคัญอย่างมากต่อการอนุรักษ์โบราณสถานที่สำคัญแห่งนี้ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายที่จะนำเสนอการใช้เทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติ ด้วยแสงเลเซอร์และการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวัดพระราม โดยข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติที่ได้จากเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์สภาพตำแหน่งปัจจุบันรวมถึงความโน้มเอียงที่ตำแหน่งยอดของเจดีย์ ผลการศึกษาพบว่าเจดีย์มีความสูงอยู่ที่ 40.54 เมตร และพบว่าเจดีย์เอียงตัวไปในทิศตะวันตกเฉียงใต้เป็นมุม 0.34 องศา จากข้อมูลการสำรวจพบว่าวัสดุหลักที่ใช้สร้างเจดีย์ประกอบด้วยวัสดุพื้นฐาน 2 ชนิดได้แก่อิฐโบราณและศิลาแลงซึ่งทำให้การวิเคราะห์โครงสร้างวัดพระรามเป็นปัญหาที่ท้าทาย ดังนั้นการศึกษานี้จึงนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการประเมินการกระจายความเค้นและวิเคราะห์พฤติกรรมการสั่นอิสระของเจดีย์ พบว่าค่าความเค้นดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 233.80 กิโลปาสกาล และค่าความเค้นอัดมีค่าเท่ากับ 1241.02 กิโลปาสกาล ซึ่งในที่สุดจะทำให้สามารถแสดงข้อมูลการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้น รูปแบบความเสียหายที่สามารถเป็นไปได้ รวมถึงค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นของเจดีย์ โดยจะแสดงผลการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการใช้สมบัติวัสดุสองชนิดที่ต่างกัน ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

คำสำคัญ: เจดีย์ของไทย, เทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วัดพระราม

Abstract

Wat Phra Ram was built in the early Ayutthaya period. It is one of the famous Thai historic sites in the Ayutthaya historical park. The main pagoda is the corn-cob shape influenced by the ancient Khmer style of the Lawo Kingdom. Precise physical data and in-depth knowledge of structural behavior are essential to

preserving this significant historical building. Consequently, this paper aims to present the application of 3D laser scanning technology and the finite element analysis of Wat Phra Ram. The 3D point cloud data from the 3D laser scanner is applied to develop the simplified 3D solid model of Wat Phra Ram's main pagoda. From the result show that height of the main pagoda is 40.54 meters. The inclination angle of Wat Phra Ram is 0.34 degree in southwest direction. The primary materials of the pagoda are ancient brick and laterite, which is a challenging problem in structural analysis. Therefore, the finite element method is applied to evaluate the pagoda's stress distribution and free vibrations behaviors. The maximum tensile stress and the maximum compressive stress due to static analysis are 233.80 kPa and 1241.02 kPa respectively. Finally, the pagoda stress distribution, the possible damage pattern, the natural frequencies, and corresponding mode shapes are presented. The comparison of using two materials' properties in the finite element model on the finite element solutions is also investigated.

Keywords: Thai Pagoda, 3D laser scanning technology, finite element analysis, Wat Phra Ram

1. คำนำ

เจดีย์ไทยโบราณสะท้อนให้เห็นถึงวัฒนธรรมและประวัติศาสตร์ของชาติไทย โครงสร้างมรดกเหล่านี้แสดงถึงความรู้อันทรงคุณค่าทางวิศวกรรมและสถาปัตยกรรมของคนไทยในศตวรรษที่ผ่านมา การตรวจสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้างมีความสำคัญต่อการอนุรักษ์เจดีย์ไทยโบราณในปัจจุบัน วัดพระราม เป็นโบราณสถานสมัยอยุธยาตอนต้น แสดงดังรูปที่ 1 นักโบราณคดีสันนิษฐานไว้ว่า สมเด็จพระรามาเมศวร ทรงโปรดเกล้าให้สร้างขึ้นบริเวณที่ถวายพระเพลิงพระบรมศพของ สมเด็จพระรามาธิบดีที่ 1 (พระเจ้าอู่ทอง) โดยตั้งอยู่ในอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา ที่ได้รับการแต่งตั้งให้เป็นแหล่งมรดกโลกในชื่อ “นครประวัติศาสตร์

พระนครศรีอยุธยา” โดยองค์การการศึกษา วิทยาศาสตร์ และวัฒนธรรม แห่งสหประชาชาติ หรือ ยูเนสโก (UNESCO) องค์เจดีย์ประธานเป็น สถาปัตยกรรมสมัยอยุธยาตอนต้นที่นิยมทำศาสนสถานเป็นพระปรางค์ เพราะได้รับอิทธิพลแบบเขมรโบราณจากเมืองละโว้ (ลพบุรี) ซึ่งเป็น สัญลักษณ์ของ เขาพระสุเมรุ ตามความเชื่อของศาสนาฮินดู องค์เจดีย์ ประธานเป็นทรงฝักข้าวโพด มีความสูง 40.54 เมตร อีกทั้งยังมีเจดีย์ทรง ปรางค์ขนาดเล็กขนาดทั้ง 2 ข้าง บริเวณมุมทั้ง 4 มุม มีเจดีย์ทรงปราสาท ยอดตั้งอยู่ ซึ่งในปัจจุบันเหลืออยู่แค่ 2 มุม ในส่วนของการตรวจสอบ เบื้องต้นโครงสร้างของวัดพระรามพบว่าวัสดุหลักที่ถูกนำมาก่อสร้างมี 2 ชนิด ได้แก่ ศิลาแลง และ อิฐโบราณ เนื่องด้วยอายุที่ยาวนานและเก่าแก่ กว่า 6 ศตวรรษ โบราณสถานแห่งนี้ได้เสื่อมโทรมลงตามกาลเวลาเนื่องจาก ผลกระทบของสภาพแวดล้อม ทำให้วัสดุของโบราณสถานเสื่อมสภาพลง การตรวจสอบและประเมินสภาพปัจจุบันของโบราณสถานแห่งนี้จึงเป็นสิ่งที่ มีความสำคัญอย่างมาก



รูปที่ 1 วัดพระราม จ.พระนครศรีอยุธยา

เทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์เป็นเทคโนโลยีที่ทันสมัยที่มีความละเอียดแม่นยำสูง และสามารถเก็บข้อมูลได้ครบถ้วนได้ในระยะเวลาอันสั้น การศึกษาที่มุ่งนำเสนอข้อมูลที่ได้มาจากเทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติแบบแสงเลเซอร์ มาวิเคราะห์ขนาดมิติและประเมินความโน้มเอียงของเจดีย์ประธาน และทำการสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อประเมินการกระจายความเค้น ความถี่ธรรมชาติ และรูปแบบการสั่นขององค์เจดีย์ ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้สามารถนำไปใช้ในการติดตามสภาพโครงสร้างและเป็นฐานข้อมูลดิจิทัลเพื่อประกอบการอนุรักษ์วัดพระรามในระยะยาวได้ต่อไปในอนาคต

2. หลักการและการศึกษาที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์เป็นเทคโนโลยีที่มีความสามารถในการเก็บข้อมูลทางกายภาพของวัตถุ หลักการทำงานของเทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ จะยิงแสงเลเซอร์เพื่อไปตกกระทบกับตัววัตถุแล้วสะท้อนกับมาหาอุปกรณ์รับคลื่นแสงจากนั้นจะทำการประเมินระยะทางจากเวลาและความต่างเฟสของคลื่นแสง ข้อมูลที่ได้มาจะเป็นข้อมูลในระบบพิกัด 3 มิติ (X,Y,Z) รวมถึง ค่าเฉดสี (r, g, b) [1] เมื่อได้ข้อมูลจากการเก็บข้อมูลภาคสนามแล้วจากนั้นข้อมูลจะถูก

นำไปประมวลผลผ่านโปรแกรมด้วยหลักการซ้อนทับของกลุ่มจุดด้วยกระบวนการ Point cloud registration และผลลัพธ์ที่ได้ คือ ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ (Point Cloud) [2] ที่มีรูปร่างเหมือนกับโบราณสถานในสภาพจริงทุกประการ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และประเมินขนาด พิกัด รูปร่าง รวมถึงสามารถนำไปสร้างแบบจำลองโครงสร้างโบราณสถานได้อย่างแม่นยำ

Yumin et al. [3] รายงานการใช้เทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ เพื่อทำการเก็บข้อมูลและอนุรักษ์งานแกะสลักถ้ำในประเทศจีนพบว่า จากการลงพื้นที่จริงมีอุปสรรคสำคัญคือเรื่องของแสงสว่างที่น้อยแต่การใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติยังคงสามารถเก็บข้อมูลที่มีความละเอียดและแม่นยำแม้ในสถานที่ซึ่งมีแสงสว่างน้อย อีกทั้งยังใช้เวลาเก็บข้อมูลไม่นานและไม่ต้องสัมผัสโดยตรงกับพื้นผิวของโบราณวัตถุ

Pritchard D., et al. [4] และ Castagnetti C., et al. [5] ได้นำเทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ มาเก็บข้อมูลโบราณสถานที่มีความซับซ้อน สรุปได้ว่าข้อมูลนั้นมีความละเอียด ครบถ้วน และมีประสิทธิภาพสำหรับการใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างพร้อมทั้งสามารถนำไปจัดทำเป็นฐานข้อมูลดิจิทัล

ในส่วนของ การใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติเพื่อการเก็บข้อมูลโบราณสถานของไทยนั้น สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์ และคณะ [6,7] ได้ทำการลงพื้นที่สำรวจและเก็บข้อมูลทางกายภาพของโบราณสถานในเขตอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย และอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพโดยใช้เทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ โดยข้อมูลที่ได้อีกคือพิกัด ขนาด และขนาดมิติที่ได้มานั้นมีความครบถ้วนและแม่นยำ พร้อมทั้งแสดงแนวทางในการตรวจสอบและประเมินความมั่นคงของโครงสร้างด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมถึงจัดทำต้นแบบฐานข้อมูลดิจิทัลทางด้านวิศวกรรมเพื่อใช้ในการติดตามสภาพโบราณสถานของไทย

ภาสุ สายรวมญาติ [8] และ Mahasuwanchai P., et al. [9] ได้นำเสนอวิธีการและผลการติดตามสภาพระยะยาวของเจดีย์วัดกระเจี๊ยบด้วยเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ โดยมีการสร้างหอดูดาวเพื่อประกอบการติดตามสภาพระยะยาว การเก็บข้อมูลทั้งหมด 5 ครั้งระหว่างปี 2561-2563 พบว่ายอดเจดีย์เอียงไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ โดยมุมเอียงของเจดีย์มีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามผลการติดตามสภาพเป็นระยะเวลาประมาณ 2 ปี 6 เดือน ซึ่งการตกแต่งกิ่งต้นไม้ใหญ่ที่พันรอบเจดีย์เพื่อชะลอการเจริญเติบโต รวมถึงการเสริมความมั่นคงแข็งแรงที่ดำเนินการโดยกรมศิลปากรส่งผลให้อัตราการเพิ่มขึ้นของมุมเอียงลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ นอกจากนี้ภาสุ สายรวมญาติ [8] ยังได้เสนอแนวทางการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการประเมินเสถียรภาพของโครงสร้างเจดีย์ทรงระฆังซึ่งได้รับผลกระทบจากการลักลอบเจาะทำลาย ผลการศึกษาสามารถใช้เป็นแนวทางในการประเมินเสถียรภาพของเจดีย์ในระยะยาวได้เป็นอย่างดี

สุวัจชัย แก้วมาคุณและคณะ [10] ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติเก็บข้อมูลและรายงานผลการวิเคราะห์ขนาดมิติและความโน้มเอียงของเจดีย์ของ วัดศรีพิจิตรกิตติภยาราม จ. สุโขทัย จากการวิจัยพบว่าเจดีย์มีความสูง 29.45 เมตร และบริเวณก้านฉัตรถึงยอดเจดีย์มีมุมเอียง 2.01

องศา ไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ โดยข้อมูลที่ได้สามารถนำมาสร้างเป็นแบบจำลองเพื่อการวิเคราะห์ผลของแรงแผ่นดินไหวที่มีต่อเจดีย์วัดศรีพิจิตร กิริติกัลยาพบว่าเจดีย์มีการเคลื่อนตัวบริเวณยอดเท่ากับ 18.24 เซนติเมตร ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าค่าหน่วยแรงดึงและหน่วยแรงอัดสูงสุดคือ 53 กิโลปาสกาล และ 372 กิโลปาสกาลตามลำดับ

ภคพงศ์ ภัทราคม [11] รายงานผลการวิเคราะห์พฤติกรรมภายใต้ น้ำหนักของเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล จ. พระนครศรีอยุธยา พบว่าหน่วยแรงแบกทานในสภาวะปัจจุบันที่ฐานมีค่าสูงสุดเท่ากับ 350 กิโลปาสกาล ยังไม่เกินค่าหน่วยแรงประลัยของวัสดุ พร้อมทั้งมีการวิเคราะห์ในกรณีโครงสร้างเอียงเพิ่มขึ้นพบว่าผลการประเมินแรงดึงยังไม่เกินค่าหน่วยแรงประลัยของวัสดุเช่นกัน

Adam., et al. [12] นำเสนอการประเมินโครงสร้าง และพิจารณาอัตราส่วนความปลอดภัยของสุเหร่า Al-Rifa ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากผลวิจัยพบว่าค่าการสั่นของตัวโครงสร้างจะอ้างอิงมาจากความสูงและรูปทรงของตัวโครงสร้าง

สิริวิทย์ สุขศิลาและคณะ [13] นำเสนอผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของวัดมหาธาตุ จ.สุโขทัย พบว่าค่าหน่วยแรงดึงและแรงอัดสูงสุดอยู่ที่ 33.8 กิโลปาสกาล และ 391.3 กิโลปาสกาล ตามลำดับ ผลการศึกษา รายงานค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นจำนวน 12 รูปแบบ และจากการพิจารณาผลของแรงแผ่นดินไหวพบว่าการเคลื่อนตัวเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวอยู่ในช่วง 15.50–21.64 เซนติเมตร ผลของการประเมินสภาพปัจจุบันของวัดด้วยเทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์พบว่าเจดีย์ประธานโน้มเอียง 0.98 องศา ไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้

พีรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย [14] ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของวัดหลังคาขาว จ.พระนครศรีอยุธยา จากข้อมูลการสแกนวัตถุ 3 มิติ ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าความเค้นอัดสูงสุดคือ 266.7 กิโลปาสกาล เกิดบริเวณเพดานด้านในและ 47.2 กิโลปาสกาลคือค่าความเค้นดึงสูงสุด บริเวณฐานด้านในองค์เจดีย์ พร้อมทั้งมีการคำนวณค่าความปลอดภัยโดยเทียบกับกำลังรับแรงอัดสูงสุดของวัสดุ และมีการรายงานการเพิ่มค่าความหนาแน่นทำให้ค่าความเค้นเพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปัวซองไม่ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยยะสำคัญ

Wethyavivom B., et al. [15] ได้ทำการตรวจสอบความเค้นของเจดีย์ทรงปราสาทและทรงระฆังด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ พบว่าค่าความเค้นอัดและความเค้นดึงสูงสุดของตัวโครงสร้างเกิดบริเวณซุ้มประตูกับองค์เจดีย์ และพบว่าเจดีย์ทั้ง 2 ชนิดนั้นมีความมั่นคงและปลอดภัยภายใต้น้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง

จากการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าการศึกษาที่ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติในการเก็บข้อมูลโบราณสถานประเภทปราสาทรั้วกับการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์โครงสร้างที่ประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดยังมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีเป้าหมายเพื่อนำเสนอวิธีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติในการเก็บข้อมูลและสร้างแบบจำลองโบราณสถานประเภทปราสาทรั้ว รวมถึงแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปราสาทรั้วที่มีวัสดุหลัก 2 ชนิด ผ่านกรณีศึกษา

วัดพระราม ซึ่งผลการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อการอนุรักษ์วัดพระรามได้ต่อไปในอนาคต

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ในการเก็บข้อมูลทางกายภาพของวัดพระราม จ. พระนครศรีอยุธยา เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์สภาพปัจจุบัน พร้อมทั้งพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางสถิตยศาสตร์ ค่าความถี่ธรรมชาติ และรูปแบบการสั่นขององค์เจดีย์ประธาน โดยพิจารณาผลของการใช้วัสดุหลักร่วมกัน 2 ชนิดอันได้แก่อิฐ และศิลาแลง

3.1 การสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนามด้วยเทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์

การศึกษานี้ใช้เครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ยี่ห้อ FARO focus3D x330 ในการเก็บข้อมูลสภาพปัจจุบันของวัดพระราม ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีการกำหนดความละเอียดอยู่ที่ 1/5 หรือ 28 ล้านจุด ต่อ 1 จุดตั้งเครื่องมือ และคุณภาพที่ 4X มีความเร็วในการเก็บข้อมูลอยู่ที่ 122000 จุดต่อวินาที [2] โดยคณะผู้วิจัยลงพื้นที่สำรวจข้อมูลในช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2563



รูปที่ 2 การเก็บข้อมูลด้วยกล้อง FARO focus3D x330

3.2 การประมวลผลข้อมูลของกลุ่มจุด 3 มิติ

ข้อมูลพิกัดจุดที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนามด้วยเทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์จะผ่านการประมวลผลเพื่อจัดทำข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ (point cloud data) ของวัดพระราม ดังรูปที่ 3 ข้อมูลพิกัดกลุ่มจุดที่ได้สามารถใช้ในการประเมินขนาดมิติและสภาพปัจจุบันของวัดพระรามได้อย่างละเอียดและแม่นยำ รวมถึงสามารถนำไปพัฒนาแบบจำลอง 3 มิติเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ต่อไป



รูปที่ 3 ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ (point cloud data) ของวัดพระราม

3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ การพัฒนาแบบจำลองที่ได้มาจากข้อมูลสแกนวัตถุ 3 มิติ และการกำหนดพารามิเตอร์หรือคุณสมบัติของวัสดุ

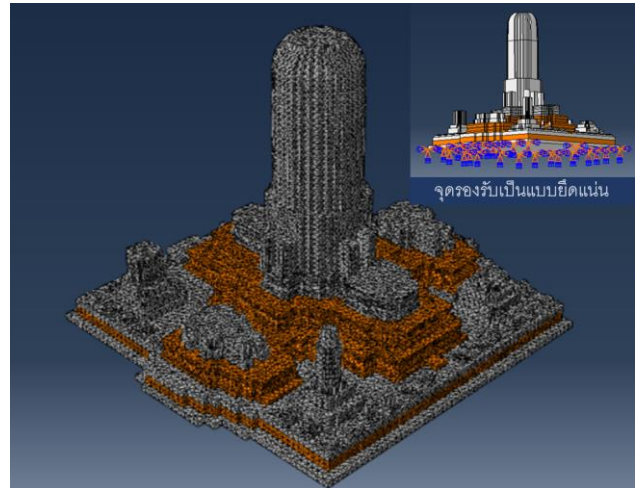
3.3.1 การพัฒนาแบบจำลอง

ข้อมูลกลุ่มจุดที่ถูกประมวลผลแล้วถูกนำมาพัฒนาเป็นแบบจำลองขององค์เจดีย์วัดพระราม ด้วยโปรแกรม AutoCAD3D ดังรูป 4 จากรูปแสดงให้เห็นว่ามี การแบ่งสัดส่วนตามสี เนื่องจากวัสดุหลักในการก่อสร้างวัดพระรามประกอบด้วย 2 ส่วนคือ อิฐโบราณกำหนดให้เป็นสีเทา และศิลาแลงกำหนดให้เป็นสีน้ำตาล



รูปที่ 4 แบบจำลองขององค์เจดีย์พระราม

จากนั้นนำแบบจำลองเข้าสู่โปรแกรม Abaqus สำหรับการศึกษานี้ชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้ คือ C3D10 มีขนาด 0.7 เมตร สามารถแบ่งชิ้นส่วนของแบบจำลองได้ทั้งหมด 336055 เอลิเมนต์ โดยแบ่งเป็นส่วนของอิฐโบราณ 195448 เอลิเมนต์ และศิลาแลง 140607 เอลิเมนต์ การวิเคราะห์กำหนดให้บริเวณฐานขององค์เจดีย์มีจุดรองรับแบบยึดแน่นโดยสมบูรณ์ (Fixed end) แสดงดังรูป 5 วัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์โครงสร้างขององค์เจดีย์พระรามในสถานะสถิตยศาสตร์ คือการทราบค่าความเค้นอัดและความเค้นดึงสูงสุด รวมถึงลักษณะการกระจายความเค้น ตลอดจนวิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นของตัวโครงสร้าง พร้อมทั้งมีการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์สำหรับการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่แตกต่างกัน



รูปที่ 5 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ขององค์เจดีย์พระราม

3.3.2 ค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรม Abaqus ในส่วนของการวิเคราะห์ทางสถิตยศาสตร์จะวิเคราะห์ภายใต้หน้าหนักเจดีย์เป็นหลักและกำหนดแบบจำลองให้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้น (Linear Elastic Model) โดยสมบัติของวัสดุจะอ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัยของ Wonganan N., et al. [16], สุทัศน์ สิลาทวิวัฒน์ และคณะ [6,7] และ วรศักดิ์ กนกนุกุลชัย [17] ตามตารางที่ 1 โดยค่าความหนาแน่นของ 2 วัสดุจะต่างกันตามงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ส่วนค่าอัตราส่วนปัวซอง และโมดูลัสความยืดหยุ่นนั้นยังไม่มีผลการรายงานผลที่ชัดเจนดังนั้นการศึกษานี้จึงกำหนดให้มีค่าเดียวกันตามผลงานวิจัย [6,7] ซึ่งรายงานผลการทดสอบทางกลของอิฐก่อโบราณและอิฐก่อทดแทน

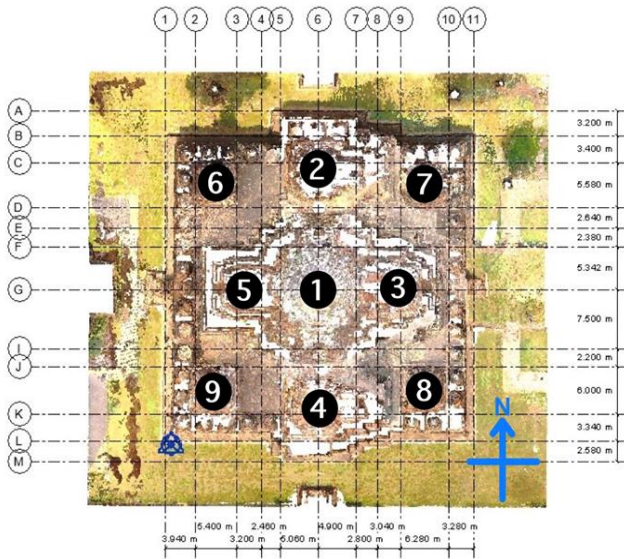
ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง

สมบัติของวัสดุ	อิฐ	ศิลาแลง	หน่วย
ความหนาแน่น	1600	2280	กก./ซม. ³
โมดูลัสยืดหยุ่น	444	444	เมกะปาสคาล
อัตราส่วนปัวซอง	0.216	0.216	-

4. ผลการศึกษา

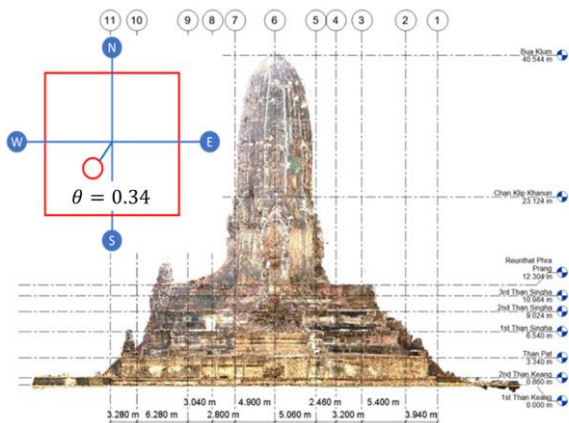
4.1 ผลจากการประมวลผลข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ

ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติที่ได้จากการลงพื้นที่เก็บข้อมูลด้วยเทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ เมื่อนำมาประมวลผลแล้วสามารถสร้างผังบริเวณ วัดขนาดมิติ รวมทั้งวัดความโน้มเอียงของตัวเจดีย์ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 6 จากผังบริเวณพบว่าในบริเวณวัดพระรามมีเจดีย์ทั้งหมด 9 องค์ เจดีย์ที่มีความสมบูรณ์สามารถวัดความโน้มเอียงได้คือ เจดีย์พระรามทรงปราสาท และเจดีย์ประจำมุม หมายเลข 6 และหมายเลข 8



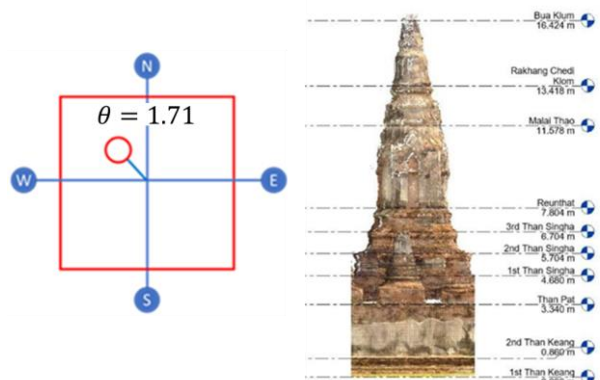
รูปที่ 6 ผังบริเวณของวัดพระราม

สำหรับเจดีย์ประธานวัดพระรามมีความสูงจากระดับพื้นดินถึงปลายยอดเจดีย์ประมาณ 40.54 เมตร การวัดความโน้มเอียงของเจดีย์ทำได้โดยการสร้างเส้นระดับที่ฐานและบริเวณยอดจากนั้นได้ทำการสร้างเส้นรอบรูปของทั้ง 2 ส่วน โดยทำการวัดจากจุดกึ่งกลางของฐานและจุดกึ่งกลางของยอดเจดีย์ ผลของการวัดความโน้มเอียงขององค์เจดีย์ประธานพบว่าเจดีย์เอียงตัวไปในทิศตะวันตกเฉียงใต้เป็นมุม 0.34 องศา ดังรูปที่ 7

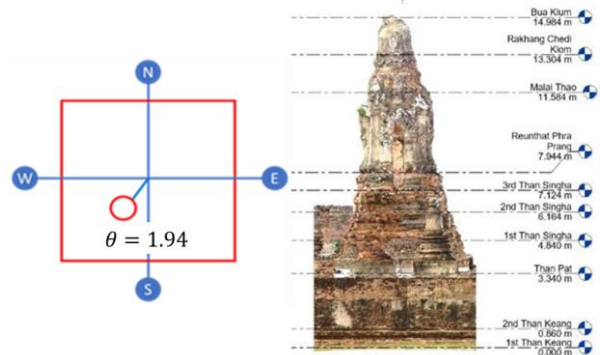


รูปที่ 7 การสร้างเส้นระดับ และการวัดความโน้มเอียงขององค์เจดีย์ประธาน

นอกจากนี้ยังมีเจดีย์บริวารประจำมุมทั้ง 2 ที่ตั้งอยู่เจดีย์ทั้ง 2 เป็นเจดีย์ทรงปราสาทยอดเจดีย์หมายเลข 6 เอียงไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือเป็นมุม 1.71 องศา และเจดีย์หมายเลข 8 เอียงไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้เป็นมุม 1.94 องศา ดังรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ



รูปที่ 8 การสร้างเส้นระดับ และการวัดความโน้มเอียงของเจดีย์มุมหมายเลข 6

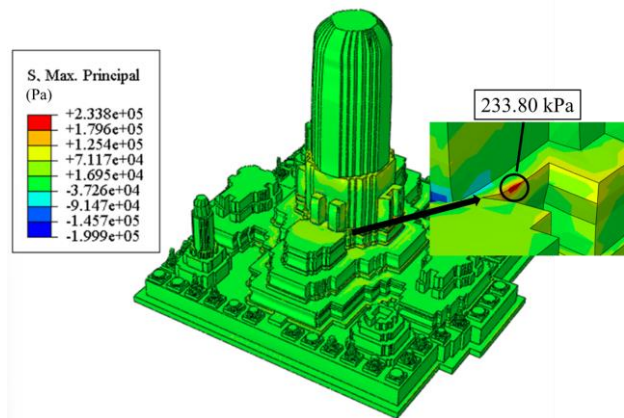


รูปที่ 9 การสร้างเส้นระดับ และการวัดความโน้มเอียงของเจดีย์มุมหมายเลข 8

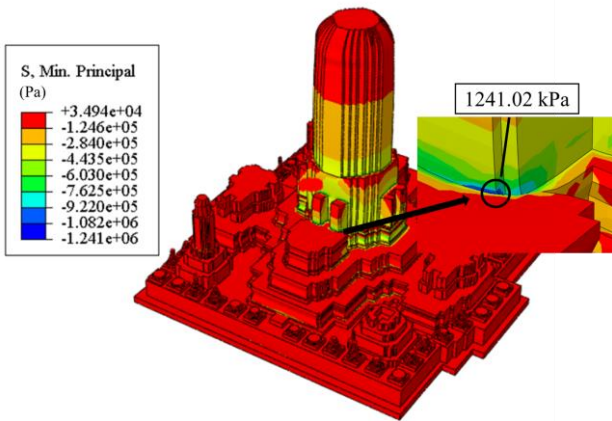
4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างขององค์เจดีย์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.2.1 ผลวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทางสถิตยศาสตร์

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิตยศาสตร์พิจารณาจากน้ำหนักของตัวโครงสร้างโดยอ้างอิงจากค่าสมบัติวัสดุตามตารางที่ 1 พบว่าค่าความเค้นดึงสูงสุดและค่าความเค้นอัดสูงสุดเกิดบริเวณซุ้มประตูทิศตะวันออกทั้งคู่ แสดงดังรูป 10 และ 11 ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าความเค้นดึงสูงสุดและค่าความเค้นอัดสูงสุดมีค่า 233.80 กิโลปาสคาล และ 1241.02 กิโลปาสคาลตามลำดับ

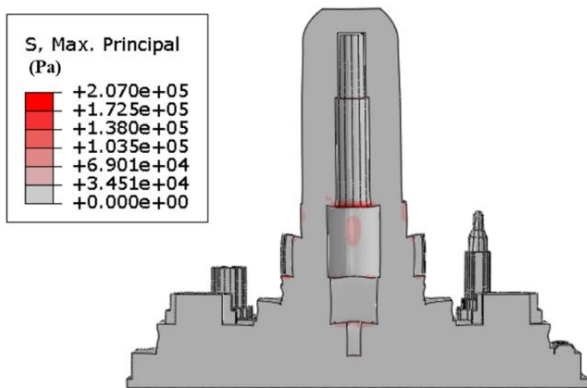


รูปที่ 10 ตำแหน่งของค่าความเค้นดึงมากที่สุด บริเวณซุ้มประตูทางทิศตะวันออก

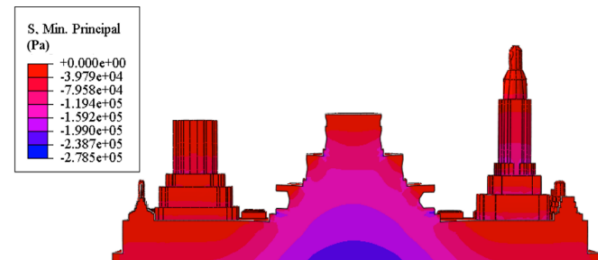


รูปที่ 11 ตำแหน่งของค่าความเค้นอัดมากที่สุด บริเวณซุ้มประตูทางทิศตะวันออก

การศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของความเค้นดึงและความเค้นอัด พบว่าการกระจายความเค้นดึงอยู่ในช่วง 172.5-207 กิโลปาสกาลโดยเกิดมากที่สุดบริเวณเพดานกรุด้านในของเจดีย์ แสดงดังรูป 12 ค่าการกระจายความเค้นอัดอยู่ในช่วง 238.7-278.5 กิโลปาสกาลเกิดบริเวณฐานของตัวเจดีย์ แสดงดังรูป 13



รูปที่ 12 บริเวณการกระจายความเค้นดึงของเจดีย์



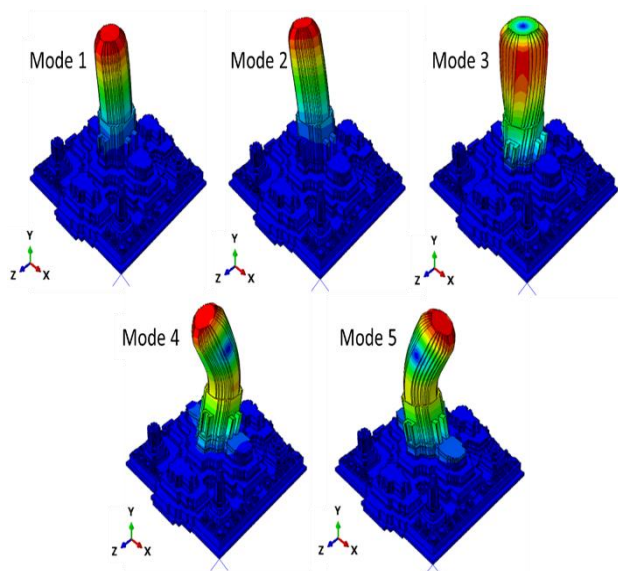
รูปที่ 13 บริเวณการกระจายความเค้นอัดของเจดีย์

4.3 ตัวอย่างความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่น

สำหรับการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นมีผลใกล้เคียงกันและทิศทางของการสั่นเกิดในทิศทางที่ตั้งฉากกันซึ่งตัวอย่างรูปแบบการสั่นไหวทั้ง 5 ลำดับแรกแสดงได้ดังรูป 14 โดยค่าความถี่ธรรมชาติและทิศทางการการสั่นระบุในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความถี่ธรรมชาติขององค์เจดีย์

โหมด	ทิศทาง	ความถี่ (Hz)	คาบ (sec)
1	แกน Z	0.8459	1.1822
2	แกน x	0.8676	1.1526
3	บิดตัวในแกน Y	3.1159	0.3209
4	แกน Y	3.3667	0.2970
5	แกน Y	3.5486	0.2818

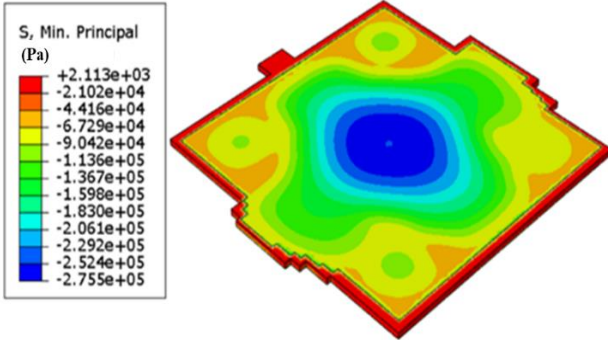


รูปที่ 14 รูปแบบการสั่นไหวของเจดีย์ทั้ง 5 โหมดแรก

4.4 ผลวิเคราะห์การเปรียบเทียบการใช้คุณสมบัติของวัสดุที่ต่างกัน

การศึกษานี้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองที่ใช้วัสดุชนิดเดียวกับแบบจำลองที่ประกอบด้วยวัสดุที่แท้จริง 2 ชนิด โดยแบ่งการศึกษาเป็น 3 กรณี กรณีแรกพิจารณาวัสดุตามสภาพจริงประกอบด้วยอิฐโบราณและศิลาแลง กรณีที่สองพิจารณาวัสดุเป็นอิฐโบราณทั้งหมด และกรณีสุดท้ายพิจารณาวัสดุเป็นศิลาแลงทั้งหมด โดยเมื่อทำการวิเคราะห์แล้วพบว่ามวลรวมของโครงสร้างเจดีย์มีค่าเท่ากับ 20681.74 ตัน 17317.95 ตัน และ 24678.08 ตัน ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางสถิตยศาสตร์และการสั่นอิสระพบว่าน้ำหนักของตัวโครงสร้างตามชนิดของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อค่าความเค้นดึงและค่าความเค้นอัดสูงสุด โดยเมื่อพิจารณาบริเวณที่เกิดผลกระทบมากที่สุด ณ บริเวณส่วนฐานของเจดีย์ การใช้วัสดุที่แตกต่างกันในแบบจำลองไม่ส่งผลต่อรูปแบบการกระจายตัวของค่าความเค้นอย่างมีนัยยะสำคัญ ดังรูป 15 แต่พบว่าค่าความเค้นดึงสูงสุดและค่าความเค้นอัดสูงสุดมีความแตกต่างอยู่ที่ 15%-21% ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4 เมื่อเทียบกับแบบจำลองเสมือนจริงที่พิจารณาวัสดุ 2 ชนิดซึ่งประกอบด้วยศิลาแลงจำนวน 4946.75 ลบ.ม. คิดเป็นน้ำหนัก 11278.59 ตัน และอิฐโบราณจำนวน 5876.97 ลบ.ม. คิดเป็นน้ำหนัก 9403.15 ตัน



รูปที่15 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นอัดของวัสดุผสม

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าความเค้นดึงสูงสุดบริเวณฐานของทั้ง 3 กรณี

วัสดุ	กิโลปาสกาล	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง
วัสดุผสม (อิฐโบราณและศิลาแลง)	43.74	-
อิฐโบราณ	35.31	19.27%
ศิลาแลง	50.31	15.02%

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าความเค้นอัดสูงสุดบริเวณฐานของทั้ง 3 กรณี

วัสดุ	กิโลปาสกาล	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง
วัสดุผสม (อิฐโบราณและศิลาแลง)	275.5	-
อิฐโบราณ	233.97	15.09%
ศิลาแลง	333.41	21.00%

ในส่วนของการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การสั่นอิสระพบว่ารูปแบบการสั่นของแบบจำลองที่ใช้วัสดุแตกต่างกันมีความใกล้เคียงกันโดยมีรูปแบบการสั่นเป็นไปในทิศทางเดียวกันตามที่รายงานในหัวข้อ 4.3 ผลกระทบของการใช้วัสดุในแบบจำลองที่ต่างกันส่งผลให้น้ำหนักเจดีย์มีความแตกต่างกันทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติของเจดีย์ประธานมีความแตกต่างกัน โดยพบว่าแบบจำลองที่ใช้วัสดุเป็นศิลาแลงเพียงอย่างเดียวทำให้มีค่าความถี่ที่ต่ำกว่าการพิจารณาวัสดุหลักร่วมกันสองชนิดอยู่ประมาณ 16 % ดังแสดงในตารางที่ 5 ส่วนกรณีที่พิจารณาวัสดุเป็นอิฐเพียงอย่างเดียวพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับวัสดุหลัก เนื่องจากวัสดุส่วนที่เป็นศิลาแลงจะใช้สร้างเป็นฐานเป็นส่วนใหญ่ ส่วนโครงสร้างองค์เจดีย์จะสร้างด้วยอิฐก่อ จึงส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติของกรณีที่พิจารณาวัสดุเป็นอิฐเพียงอย่างเดียวมีความใกล้เคียงกับกรณีที่พิจารณาวัสดุหลักในแบบจำลองเป็นวัสดุ 2 ชนิด

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความถี่จากการใช้วัสดุในแบบจำลองที่ต่างกัน

โหมด	อิฐโบราณและศิลาแลง Hz	ศิลาแลง Hz	อิฐโบราณ Hz
1	0.8459	0.7088 (16.21%)	0.8460 (0.014%)
2	0.8676	0.7268 (16.23%)	0.8677 (0.002%)
3	3.1159	2.6110 (16.20%)	3.1168 (0.029%)
4	3.3667	2.8242 (16.11%)	3.3713 (0.137%)
5	3.5486	2.9771 (16.11%)	3.5539 (0.149%)

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้นำเสนอวิธีการประยุกต์ใช้ข้อมูลการสแกนวัตถุ 3 มิติในการประเมินสภาพปัจจุบันของเจดีย์ประธาน วัดพระราม และสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างในสถานะสมดุลสถิตรวมถึงวิเคราะห์การสั่นอิสระของเจดีย์ประธานด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. ข้อมูลพิกัดกลุ่มจุด 3 มิติของวัดพระรามที่ได้จากเทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์มีความละเอียด แม่นยำ โดยสามารถเก็บข้อมูลในพื้นที่ซับซ้อนได้โดยส่งผลให้ได้ข้อมูลพิกัดที่จำเป็นจำนวนมากในระยะเวลาอันสั้นเมื่อเทียบกับการสำรวจด้วยวิธีดั้งเดิม จากการประเมินผลพบว่าเจดีย์มีความสูงอยู่ที่ 40.54 เมตร การวัดความโน้มเอียงของเจดีย์ประธานและเจดีย์บริวารทั้ง 2 พบว่า องค์เจดีย์ประธานเอียงไปทิศตะวันตกเฉียงใต้เป็นมุม 0.34 องศา ในส่วนของเจดีย์บริวารหมายเลข 6 เอียงไปทิศตะวันออกเฉียงเหนือเป็นมุม 1.71 องศา และเจดีย์บริวารหมายเลข 8 เอียงไปทิศตะวันตกเฉียงใต้เป็นมุม 1.94 องศา

2. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพบว่าค่าความเค้นดึงสูงสุดและค่าความเค้นอัดสูงสุดภายใต้น้ำหนักของตัวเจดีย์เกิดขึ้นบริเวณซุ้มประตูทางทิศตะวันออกมีค่าเท่ากับ 233.80 กิโลปาสกาล และ 1241.02 กิโลปาสกาล การเปลี่ยนรูปแบบการจำลองวัสดุทั้ง 3 แนวทางส่งผลให้น้ำหนักของเจดีย์แตกต่างกันซึ่งทำให้ค่าความเค้นดึงและค่าความเค้นอัดสูงสุดมีความแตกต่างกันตามน้ำหนักของวัสดุที่ใช้โดยมีค่าความแตกต่างในช่วงร้อยละ 15-21 เมื่อเทียบกับกรณีจำลองวัสดุเป็น 2 ชนิดประกอบกัน อย่างไรก็ตามการจำลองชนิดของวัสดุที่ต่างกันไม่ส่งต่อลักษณะการกระจายตัวของความเค้นอย่างมีนัยสำคัญ

3. ผลการวิเคราะห์การสั่นอิสระของเจดีย์ประธานพบว่าค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐานเปลี่ยนแปลงไปตามประเภทวัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง โดยความถี่ธรรมชาติ 5 อันดับแรกของแบบจำลองที่พิจารณาวัสดุเป็นศิลาแลงเพียงอย่างเดียวจะมีความแตกต่างกับแบบจำลองซึ่งวัสดุหลักมี 2 ชนิดอยู่ในช่วง 16.1%-16.2% ส่วนกรณีที่พิจารณาวัสดุเป็นอิฐโบราณเพียงอย่างเดียว

เดียวพบว่าค่าความถี่ธรรมชาติ 5 อันดับแรกสอดคล้องกับกรณีที่พิจารณา
วัสดุก่อสร้างเป็นวัสดุ 2 ชนิด โดยค่าความถี่ธรรมชาติไม่มีความแตกต่างกัน
อย่างมีนัยยะสำคัญ เนื่องจากบริเวณที่เกิดการสั่นอย่างชัดเจนของตัว
โครงสร้างจะเกิดขึ้นบริเวณองค์เจดีย์ซึ่งก่อสร้างด้วยอิฐโบราณเป็นหลัก

ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ การวัดขนาดมิติ ผลการประเมินความโน้มเอียง
ขององค์เจดีย์ รวมถึงผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้
จากการศึกษา นี้ จะเป็นฐานข้อมูลดิจิทัลสำหรับใช้ประโยชน์ในด้าน การ
ประเมินและติดตามสภาพวัดพระราม เพื่อการอนุรักษ์ในระยะยาวได้ต่อไป
ในอนาคต ตลอดจนสามารถเป็นต้นแบบในการต่อยอดในการวิจัยเพื่อการ
อนุรักษ์โบราณสถานของไทยในรูปแบบอื่นต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริม
วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ทุนสนับสนุนด้านวิทยาศาสตร์
วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ พ.ศ.2566 ภายใต้รหัสโครงการ
FRB660073/0164 (เทคโนโลยีการก่อสร้างขั้นสูงและยั่งยืนสำหรับ
Thailand 4.0) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่
อุทยานประวัติศาสตร์พระนครคีรีอยุธยาที่อำนวยความสะดวกในการเข้าไป
เก็บข้อมูลภาคสนามที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Ebrahim, M. (2011). *3D Laser Scanner: History, Applications and Future*. Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Assiut University, pp 4-29.

[2] FARO Technologies Inc. (2015). *FARO LASER SCANNER FOCUS3D X330 Manual*. FARO Technologies, Inc, Lake Mary, FL, USA, 37-48

[3] Yumin, Rong Z., and Yumin, Z.Y.L. (2013). THE APPLICATION OF 3D LASER SCANNING IN THE PROTECTION OF GROTTOS AND CARVINGS IN CHINA. *XXIV International CIPA Symposium*, Strasbourg, France, 2 – 6 September 2013, pp.1-5

[4] Pritchard D., Spemer J., Hoepner S. and Tenschert R. (2017). Terrestrial laser scanning for heritage conservation: The Cologne Cathedral documentation project. *26th International CIPA Symposium 2017*, Ottawa, Canada, August 28-September 01, pp. 213-219.

[5] Castinetti C., Barsocchini E., Capra A., and Dubbini M. (2012). Terrestrial Laser Scanning for Preserving Cultural Heritage: Analysis of Geometric Anomalies for Ancient Structures. *FIG Working Week 2012 - Knowing to Manage*

the Territory, Protect the Environment, Evaluate the Cultural Heritage, Rome, Italy, 6-10 May 2012, pp. 1-11.

[6] สุทัศน์ สีสาทวิวัฒน์, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัยณรงค์ อธิสกุล, รักติพงษ์ สหมิตรมงคล และ เสน่ห์ มหาผล (2562). โครงการพัฒนาฐานข้อมูล, ทางวิศวกรรมเพื่อการประเมินและติดตามสภาพโครงสร้างโบราณสถานของไทย. *สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม*, หน้า 29-87.

[7] สุทัศน์ สีสาทวิวัฒน์, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัยณรงค์ อธิสกุล และ รักติพงษ์ สหมิตรมงคล. (2564). การใช้ฐานข้อมูลดิจิทัลสำหรับงานวิศวกรรมเพื่อความยั่งยืนในการอนุรักษ์โบราณสถานหรืออาคารโบราณในชุมชน. *สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม*, หน้า 21-50.

[8] ภาสุ สรายมญาติ (2563). *การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ เพื่อการอนุรักษ์และติดตามสภาพเจดีย์ไทย กรณีศึกษาวัดกระวี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา*. ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,

[9] Mahasuwanchai P., Athisakul C., Sairuamyat P., Tangchirapat W., Leelataviwat S. and Chucheepeasakul S. (2021). An Alternative Method for Long-Term Monitoring of Thai Historic Pagodas Based on Terrestrial Laser Scanning Data: A Case Study of Wat Krachee in Ayutthaya. *Hindawi Advances in Civil Engineering*, pp.1-16

[10] สุวัจชัย แก้วมาคุณ, พีรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย, ชัยณรงค์ อธิสกุล และ สุทัศน์ สีสาทวิวัฒน์ (2564). ข้อมูลการสแกนวัตถุ 3 มิติและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการศึกษาผลกระทบของแรงแผ่นดินไหวต่อเจดีย์ทรงระฆังของไทย: กรณีศึกษาวัดศรีพิจิตรกิริยาศักดิ์ยาราม. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26, รูปแบบออนไลน์*, 23-25 มิถุนายน 2564, หน้า 1-7.

[11] ภคพงศ์ ภัทราคม (2560). *บูรณาการการสำรวจลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างและประเมินความมั่นคงโครงสร้างโบราณสถาน: กรณีศึกษาพระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล*. ดุษฎีนิพนธ์ สาขาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

[12] Adam M., El-salakawy T., Salama M. Mohamed A. (2020). Assessment of structural condition of a historic masonry minaret in Egypt. *Case Studies in Construction Materials*, pp. 1-20.

[13] สิริวิชญ์ สุขศิลา, พีรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย, ชัยณรงค์ อธิสกุล, สุทัศน์ สีสาทวิวัฒน์ (2564). ข้อมูลการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดินและการวิเคราะห์แผ่นดินไหวของเจดีย์วัดมหาธาตุ จังหวัดสุโขทัย. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26, รูปแบบออนไลน์*, 23-25 มิถุนายน 2564, หน้า 1-7.

- [14] พีรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย (2565), การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกน วัตถุ 3 มิติ และวิธีการไฟไนต์ เอลิเมนต์เพื่อการประเมินสภาพ โครงสร้างโบราณสถานของไทย. ดุษฎีนิพนธ์ ปรัชญาดุสิตบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
- [15] Wethyavivorn B., Surit S., Apichatyakul C. and Lerdsivanon N. (2016). Model Verification of Thai Historic Masonry Monuments, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, pp.1-13.
- [16] Wonganan N., Mahasuwanchai P., Athisakul C., Tangchirapat W., Sahamitmongkol R. and Leelataviwat S. (2020). Engineering properties of ancient masonry materials in Thailand and substitution materials for historical structures preservation., *Proceeding of International Conference on Sustainable Energy and Green Technology 2019*, 11- 14 December, Bangkok, Thailand, pp. 179-202
- [17] วรศักดิ์ กนกนุกุลชัย. (2541). โครงการถนนพทุธบูชา: ผลกระทบต่อ โครงสร้างองค์พระปฐมเจดีย์, *โยธาสาร 9*, หน้า 51-56