

## ข้อมูลการสแกน 3 มิติและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการศึกษาผลกระทบของแรงแผ่นดินไหวต่อเจดีย์ทรงระฆังของไทย: กรณีศึกษา วัดศรีพิจิตรกิตติกลาราม

### 3D LASER SCANNING DATA AND FINITE ELEMENT METHOD FOR SEISMIC ANALYSIS OF THAI BELL-SHAPED PAGODA: A CASE STUDY OF WAT SI PHICHIT KIRATI KANLAYARAM

สุวัจน์ชัย แก้วมาคุณ<sup>1,\*</sup>, พีรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย<sup>1</sup>, ชัยณรงค์ อธิสกุล<sup>1</sup> และ สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์<sup>1</sup>

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

\*Corresponding author address: suwattchai.k@mail.kmutt.ac.th

#### บทคัดย่อ

เจดีย์ที่สำคัญทางประวัติศาสตร์ของไทยในสมัยสุโขทัยถูกสร้างมาเป็นเวลากว่า 500 ปี แม้ว่าประเทศไทยจะตั้งอยู่บนพื้นที่รับแรงแผ่นดินไหวระดับต่ำถึงปานกลาง แต่จังหวัดสุโขทัยอยู่ในเขตพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหวสูงอันเนื่องมาจากรอยเลื่อนอุตรดิตถ์ ด้วยเหตุนี้โครงสร้างทางประวัติศาสตร์ของไทยในจังหวัดสุโขทัยจึงมีโอกาสดำเนินการรับผลกระทบเนื่องจากแผ่นดินไหว งานวิจัยนี้นำเสนอผลกระทบของแรงแผ่นดินไหวที่มีต่อเจดีย์ทรงระฆังของไทยซึ่งตั้งอยู่บนพื้นที่รับแรงแผ่นดินไหวในจังหวัดสุโขทัย โดยอาศัยเจดีย์ทรงระฆังวัดศรีพิจิตรกิตติกลารามเป็นกรณีศึกษา การเก็บข้อมูลกลุ่มจุดของเจดีย์จะใช้เทคโนโลยีการสแกนวัด 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดิน จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองสมมติฐานอย่างง่ายของเจดีย์จากข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ แล้วนำมาวิเคราะห์สภาพตำแหน่งปัจจุบันรวมถึงความเอียงที่ตำแหน่งยอดของเจดีย์ การวิเคราะห์โครงสร้างจะอาศัยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติศาสตร์และการวิเคราะห์การสั่นอิสระจะทำให้ได้ภาพลักษณะการกระจายความเค้น การเคลื่อนตัว ค่าความถี่ธรรมชาติ และรูปร่างการสั่นอิสระที่สอดคล้องกับค่าความถี่ธรรมชาติของเจดีย์ สำหรับการหาผลตอบสนองของเจดีย์จะใช้การเคลื่อนตัวของพื้นดินอย่างน้อยสามรูปแบบที่แตกต่างกันซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 จากผลการศึกษาพบว่าเจดีย์มีระดับความสูง 29.45 เมตร ความโน้มเอียงของเจดีย์มีค่า 2.01 องศา ไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ โดยพิจารณาจากมุมเอียงจากบริเวณก้นฉัตรที่ระดับความสูง 21.35 เมตร ขึ้นไปจนถึงปลายยอดเจดีย์ สำหรับหน่วยแรงดึงและหน่วยแรงอัดสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักของตัวโครงสร้าง มีค่า 0.53 กก./ซม.<sup>2</sup> และ 3.72 กก./ซม.<sup>2</sup> ตามลำดับ และการเคลื่อนตัวสูงสุดที่บริเวณปลายยอดของเจดีย์เนื่องจากแรงแผ่นดินไหวมีค่า 18.24 เซนติเมตร

**คำสำคัญ:** การวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหว, การสแกนวัด 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์, เจดีย์ทรงระฆัง, เจดีย์ทางประวัติศาสตร์ของไทย, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

#### Abstract

The important Thai historic pagodas in the Sukhothai era were constructed for more than 500 years. Although Thailand is located on a low to moderate seismicity area, Sukhothai is in a high-risk area due to the Uttaradit fault. Consequently, the historic structures in Sukhothai could be affected by the earthquake. This study presents the effect of seismic load on the Thai bell-shaped pagoda located on the seismicity area at Sukhothai. The Thai bell-shaped pagoda at Wat Si Phichit Kirati Kanlayaram is selected as a case study. The terrestrial laser scanning technology was applied to achieve the 3D point cloud data of the pagoda. The simplified 3D solid model of the pagoda is developed based on the obtained three-dimensional point cloud data. The pagoda's current configurations are evaluated to determine the inclination angle on the top of the pagoda. The finite element method is applied for structural analysis. According to the static and free vibration analysis, the distribution of stresses, displacement, natural frequencies, and its corresponding mode shapes are presented. The pagoda responses due to at least three different ground motions compatible with the Department of Public Works and Town & Country Planning standard (DPT standard 1301/1302-61) are presented and discussed in this paper. The results show that the height of the pagoda is 29.45 meters. The tilting angle at the top of the pagoda is 2.01 degrees in the southeast direction, measured from 21.35 meters to the top of the pagoda. The maximum tensile and compressive stress due to the self-weight are 0.53 kg/cm<sup>2</sup> and 3.72 kg/cm<sup>2</sup>, respectively. The maximum seismic displacement at the top of the pagoda is 18.24 cm.

**Keywords:** 3D Laser Scanning, Bell-shaped Pagoda, Finite Element Method, Seismic Analysis, Thai Historic Pagoda

## 1. ที่มาและความสำคัญของปัญหาวิจัย

วัดศรีพิจิตรกิริยารามเป็นโบราณสถานในสมัยสุโขทัยซึ่งตั้งอยู่นอกกำแพงเมืองสุโขทัย มีเจดีย์ประธานทรงระฆังขนาดใหญ่ก่อด้วยอิฐตั้งอยู่บนฐานสูงรูปสี่เหลี่ยมขนาดกว้างด้านละ 17 เมตร ที่ฐานด้านทิศตะวันออกและตะวันตกทำเป็นซุ้มจะนำประดิษฐานพระพุทธรูปประทับนั่ง มีฐานวิหารก่ออิฐ ขนาดกว้าง 12 เมตร ยาว 23 เมตร ทางทิศตะวันออกของเจดีย์ประธานและฐานเจดีย์ราย 4 ฐาน ตั้งอยู่รอบฐานเจดีย์ประธาน มีคูน้ำขนาดกว้างประมาณ 15 เมตร ล้อมรอบพื้นที่วัดที่มีขนาดกว้าง 40 เมตร และยาว 80 เมตร ปัจจุบันเหลือเพียงเจดีย์ประธานทรงระฆัง ดังรูปที่ 1 [1]



รูปที่ 1 เจดีย์ประธานทรงระฆังวัดศรีพิจิตรกิริยาราม [1]

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาโบราณสถานนี้ได้รับผลกระทบเนื่องจากสภาพแวดล้อมและเกิดความเสื่อมโทรมตามกาลเวลา อีกทั้งจังหวัดสุโขทัยตั้งอยู่ในพื้นที่เสี่ยงต่อการได้รับผลกระทบเนื่องจากแผ่นดินไหว เนื่องจากตั้งอยู่ใกล้กับรอยเลื่อนอุตรดิตถ์ซึ่งเป็นรอยเลื่อนมีพลัง ดังนั้นผลกระทบเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวที่มีต่อโครงสร้างโบราณสถานแห่งนี้จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องทำการศึกษา

เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์เป็นเทคโนโลยีการสำรวจสมัยใหม่ที่มีความละเอียดแม่นยำสูง โดยข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปแบบข้อมูลพิกัดกลุ่มจุดของวัตถุหรือโครงสร้างที่เราสนใจ ทำให้สามารถเก็บรายละเอียดของโครงสร้างโบราณสถานได้อย่างครบถ้วนในเวลารวดเร็ว ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำมาสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการประเมินและวิเคราะห์โครงสร้างโบราณสถานได้อย่างใกล้เคียงสภาพความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้การศึกษานี้จึงมีเป้าหมายที่จะนำเสนอการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ในการสำรวจเก็บข้อมูล รวมถึงวิเคราะห์โครงสร้างเจดีย์ทรงระฆังของไทยภายใต้ผลกระทบเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว โดยอาศัยเจดีย์ประธาน

วัดศรีพิจิตรกิริยารามเป็นกรณีศึกษา ซึ่งผลการศึกษาจะสามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับการประเมินและติดตามโครงสร้างโบราณสถานแห่งนี้ได้ในระยะยาวต่อไป รวมถึงสามารถนำไปใช้ในด้านการศึกษาทางสถาปัตยกรรมและโบราณคดี อันทำให้คนรุ่นหลังได้รับรู้ถึงแนวคิด ประวัติศาสตร์ และมรดกทางวัฒนธรรมที่สำคัญของประเทศไทย

## 2. หลักการและการศึกษาที่เกี่ยวข้อง

### 2.1. เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์

เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ เป็นเทคโนโลยีที่สามารถเก็บข้อมูลลักษณะทางกายภาพของวัตถุได้เป็นจำนวนมาก ในระยะเวลาอันสั้นได้แบบอัตโนมัติ โดยใช้ลำแสงเลเซอร์ในการวัดระยะทางจากจุดตั้งกล้องไปยังตำแหน่งของพื้นผิววัตถุ ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปแบบของค่าพิกัด  $(x, y, z)$  ที่สัมพันธ์กับตำแหน่งจุดตั้งกล้องและมีค่าเฉลี่ยรวมอยู่ด้วย [2, 3]

ในการเชื่อมต่อข้อมูลที่ได้มาจากจุดตั้งกล้องแต่ละตำแหน่งจะอาศัยโปรแกรมเฉพาะทางสำหรับการประมวลผลโดยใช้หลักการซ้อนทับกันของภาพและข้อมูล (Image Based Registration) เพื่อประมวลผลให้เป็นข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติที่เสมือนสถานที่จริง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการประเมินรายละเอียดพิกัด ขนาด และรูปร่าง รวมถึงการนำไปสร้างเป็นแบบจำลองรูปแบบสัณฐานของโบราณสถานได้

### 2.2. การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์สำหรับเก็บข้อมูลโบราณสถาน

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์มีบทบาทสำคัญสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในการประเมินและติดตามสภาพของโบราณสถานทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ โดยกรณีศึกษาในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติกับโบราณสถานมีตัวอย่างดังนี้

Castagnetti C., et al. [4] ได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ แบบภาคพื้นดินในการเก็บข้อมูลลักษณะทางกายภาพของมหาวิหารโมเดนา (The Cathedral of Modena) ซึ่งได้รับการจดทะเบียนเป็นมรดกโลกในปี ค.ศ. 1997 เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงสถิตยศาสตร์และพลศาสตร์ต่อไป จากข้อมูลที่ได้มา ทางคณะผู้วิจัยให้ข้อสรุปว่าการใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ ทำให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องและเพียงพอสำหรับการนำมาใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างในเชิงเรขาคณิต และสามารถนำมาใช้สำหรับการวางแผนในการเพิ่มความแข็งแรงและการรักษาตัวโครงสร้างได้

สุทัศน์ สีสาววิวัฒน์ และคณะ [5] ได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดิน สำหรับการเก็บข้อมูลลักษณะทางกายภาพของโบราณสถานหลายแห่งในเขต

อุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา ได้แก่ วัดไชยวัฒนาราม วัดใหญ่ชัยมงคล วัดส้ม และวัดพระศรีสรรเพชญ์ เป็นต้น การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติสามารถให้ข้อมูลด้านพิกัด ขนาด รวมถึงค่าระดับของอาคารโบราณสถานได้อย่างแม่นยำ ข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถใช้ประเมินตรวจสอบและติดตามสภาพโครงสร้างได้ ซึ่งกระบวนการและวิธีการที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นต้นแบบสำหรับการเก็บข้อมูลและการศึกษาในครั้งนี้

นอกจากตัวอย่างงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ในปัจจุบันยังพบว่ามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ กับโบราณสถานอีกเป็นจำนวนมาก อาทิ Korumaz M., et al. [6], Sairuamyat P., et al. [7], Pritchard D., et al. [8]

### 2.3. การวิเคราะห์และประเมินโครงสร้างโบราณสถาน

สำหรับงานวิศวกรรมโยธา การวิเคราะห์และประเมินโครงสร้างที่มีความซับซ้อนนั้นสามารถใช้ได้หลายวิธี ดังเช่น การลงพื้นที่และใช้เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์และประเมินโครงสร้าง ณ สถานที่จริง หรือการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ และทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งเป็นวิธีเชิงตัวเลข เพื่อทำการตรวจสอบการเสียรูป (Deformation) หน่วยแรง (Stress) รวมถึงความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นของโครงสร้าง โดยงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์และประเมินโครงสร้างโบราณสถาน มีตัวอย่างดังนี้

ภคพงศ์ ภัทราคม [9] ได้ทำการตรวจวัดการสั่นสะเทือนจากสภาพแวดล้อม เพื่อศึกษาความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่น พร้อมทั้งใช้อากาศยานไร้คนขับเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อทำประเมินโครงสร้างพระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างและทำการประเมินหาสมบัติทางวิศวกรรมของโครงสร้างที่เหมาะสม

ณัฐยา เลิศศิวนท์ [10] ได้ทำการศึกษาการตอบสนองของโบราณสถานอิฐก่อทรงระฆังเนื่องจากแผ่นดินไหว พบว่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามความสูงของโครงสร้าง ในขณะที่ความถี่ธรรมชาติจะลดลงเมื่อความสูงโครงสร้างมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับผลการวิเคราะห์พบว่าตำแหน่งของหน่วยแรงที่ควรพิจารณา 3 ตำแหน่ง ได้แก่ บริเวณล่างสุดของปล้องโถง บริเวณรอบเรือนธาตุ และบริเวณรอบฐาน

Adam M., et al. [11] ได้สร้างแบบจำลองของสุเหร่า Al-Rifa'i ซึ่งเป็นโบราณสถานในประเทศอียิปต์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างรับแรงกระทำในกรณีต่าง ๆ เพื่อประเมินสภาพของโครงสร้าง และพิจารณาอัตราส่วนความปลอดภัยที่เหมาะสมสำหรับการต้านทานแรงอันเกิดจากแผ่นดินไหว

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่ากรวิเคราะห์และประเมินผลกระทบเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวที่มีต่อโบราณสถานประเภทเจดีย์ของไทยยังมีอยู่อย่างจำกัด โดยเฉพาะกรณีเจดีย์

ประธานวัดศรีพิจิตรกิตติกลารามยังไม่พบว่ามีกรรายงานข้อมูลไว้อย่างชัดเจน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะนำเสนอการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดินเก็บข้อมูลลักษณะทางกายภาพเพื่อประเมินสภาพปัจจุบันและวิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวที่มีต่อโครงสร้างเจดีย์ประธานวัดศรีพิจิตรกิตติกลารามในเบื้องต้น เพื่อเป็นประโยชน์ในด้านวิศวกรรม สถาปัตยกรรม และโบราณคดีในระยะยาวต่อไป

### 2.4. ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว

ในการศึกษานี้ใช้มาตรฐานการออกแบบอาคารด้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว หรือ มยผ. 1301/1302-61 [12] เมื่อแผ่นดินไหวกระทำกับตัวโครงสร้างจะทำให้ตัวโครงสร้างเกิดการตอบสนองต่อแผ่นดินไหวนั้น โดยส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว คาบการสั่นพื้นฐานของตัวโครงสร้าง อัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้าง และปัจจัยประกอบอื่น ๆ โดยใน มยผ. 1301/1302-61 [12] ได้กำหนดค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบอาคารไว้ ซึ่งการศึกษานี้จะนำข้อมูลและแนวทางที่ระบุตามมาตรฐานดังกล่าวมาใช้ในการประเมินค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเจดีย์วัดศรีพิจิตรกิตติกลาราม

#### 2.4.1. ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับจังหวัดสุโขทัย

สำหรับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณาที่คาบการสั่น 0.2 วินาที ( $S_u$ ) และคาบการสั่น 1.0 วินาที ( $S_1$ ) ณ อำเภอเมืองสุโขทัย จังหวัดสุโขทัย มีค่า 0.449 และ 0.117 ตามลำดับ

#### 2.4.2. การปรับแก้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม

การปรับแก้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงที่สุด ณ บริเวณที่ตั้งของอาคาร สามารถปรับแก้ได้ด้วยสมการที่ (1) และ (2)

$$S_{MS} = F_a S_u \quad (1)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (2)$$

เมื่อ  $S_{MS}$  คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที ที่ถูกปรับแก้จากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร  $S_{M1}$  คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 1.0 วินาที ที่ถูกปรับแก้จากผลของชั้นดินที่ตั้งอาคาร  $F_a$  คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 0.2 วินาที และ  $F_v$  คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 1.0 วินาที

## 2.5. ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ

สำหรับการออกแบบ จะต้องคำนวณค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 0.2 วินาที และที่คาบการสั่น 1.0 วินาที โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) และสมการที่ (4)

$$S_{Ds} = \frac{2}{3} S_{Ms} \quad (3)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (4)$$

เมื่อ  $S_{Ds}$  คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 0.2 วินาที และ  $S_{D1}$  คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 1 วินาที

หลังจากที่ได้กราฟความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่จังหวัดสุโขทัยแล้ว การศึกษานี้จะนำข้อมูลการเคลื่อนที่ของพื้นดินจำนวน 3 ชุดข้อมูล มาปรับขนาดให้สอดคล้องกับค่าความเร่งสำหรับการออกแบบตามมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 [12] โดยปัจจัยที่สำคัญอีกประการที่มีผลต่อระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว คือ ประเภทของชั้นดิน ณ ที่ตั้งของโครงสร้าง สำหรับในกรณีที่ไม่มีข้อมูลดิน และไม่สามารถทำการสำรวจดินได้ ให้สมมติว่าประเภทของชั้นดินเป็นแบบประเภท D ตาม มยผ. 1301/1302-61 [12]

## 3. วิธีการศึกษา

ในการศึกษานี้จะใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดินเก็บข้อมูลลักษณะทางกายภาพของวัดศรีพิจิตรกิตติกลารามในสภาพปัจจุบัน และนำข้อมูลกลุ่มจุดที่ได้มาทำการวิเคราะห์ขนาดมิติของโครงสร้าง และสร้างแบบจำลอง 3 มิติของเจดีย์ประธาน เพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งทางสถิตยศาสตร์ และหาสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง รวมถึงหาค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ยอดของเจดีย์เนื่องจากแรงแผ่นดินไหวที่มีลักษณะแตกต่างกัน 3 รูปแบบที่ได้ทำการปรับค่าขนาดให้สอดคล้องกับมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 [12] โดยขั้นตอนการศึกษานี้สามารถสรุปพอสังเขปได้ดังนี้

### 3.1. การเก็บข้อมูลลักษณะทางกายภาพด้วยเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์

#### 3.1.1. การลงพื้นที่เก็บข้อมูล

สำหรับการเก็บข้อมูลลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างวัดศรีพิจิตรกิตติกลารามในสภาพปัจจุบันนี้ ได้ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดินยี่ห้อ FARO focus3D x330 ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยเลือกใช้ค่าความละเอียดประมาณ

28 ล้านจุดต่อการตั้งกล้อง ค่าความเร็วที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 122000 จุดต่อวินาที และระยะห่างระหว่างจุดสองจุดที่ระยะ 10 เมตร อยู่ที่ระยะ 7.67 มิลลิเมตร โดยทำการตั้งกล้องในตำแหน่งที่สามารถส่องเห็นโครงสร้างโบราณสถานได้อย่างชัดเจน ไม่ถูกบดบังโดยสภาพแวดล้อม และครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด



รูปที่ 2 การเก็บข้อมูลด้วยเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ

#### 3.1.2. การประมวลผลข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ

หลังจากได้ข้อมูลพิกัดกลุ่มจุดจากการลงพื้นที่เก็บข้อมูลภาคสนามแล้ว จะนำข้อมูลที่ได้จากการภาคสนามมาประมวลผลเชื่อมต่อภาพโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้เป็นข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ (point cloud data) ของวัดศรีพิจิตรกิตติกลาราม และทำการวิเคราะห์ขนาดมิติ และจัดทำแผนผังบริเวณ รวมถึงใช้ประกอบการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างดังจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

### 3.2. การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 3.2.1. ค่าพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง

ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองเจดีย์ประธานวัดศรีพิจิตรกิตติกลาราม โดยแบบจำลองเจดีย์จะถูกกำหนดให้เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Elastic Model) โดยใช้ค่าสมบัติของวัสดุ ตามตารางที่ 1 โดยอ้างอิงมาจากการวิจัยของวรศักดิ์ กนกนุกุลชัย [13] และ Wonganan N., et al. [14] ซึ่งได้ทำการศึกษาค่าสมบัติทางกลของอิฐโบราณและอิฐทดแทนสำหรับโบราณสถานในประเทศไทย

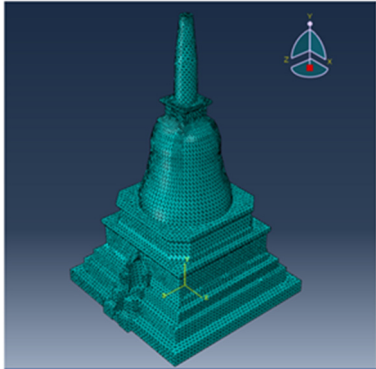
ตารางที่ 1 ค่าสมบัติของอิฐโบราณ

| สมบัติของวัสดุ                  | อิฐ   |
|---------------------------------|-------|
| ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ ) | 1600  |
| โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)           | 444   |
| อัตราส่วนปัวซอง                 | 0.216 |

#### 3.2.2. แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง

ข้อมูลกลุ่มจุดที่ผ่านการประมวลผลแล้ว สามารถนำมาสร้างเป็นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติสำหรับการวิเคราะห์

โครงสร้างได้ดังรูปที่ 3 และจะวิเคราะห์ผลตอบสนองของโครงสร้างแบบเชิงเส้นภายใต้สมมุติฐานตามหลักการความเท่ากันของการเคลื่อนที่สูงสุด โดยหลักการดังกล่าวระบุว่าค่าการเคลื่อนที่สูงสุดในสภาวะยืดหยุ่นเชิงเส้นจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าการเคลื่อนที่สูงสุดจากการประเมินแบบไม่เป็นเชิงเส้น



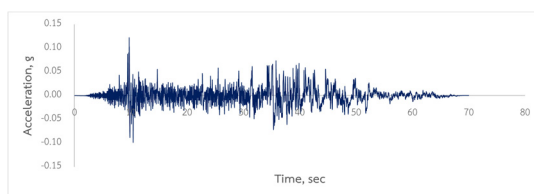
รูปที่ 3 แบบจำลอง 3 มิติสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง

### 3.2.3. คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้การวิเคราะห์

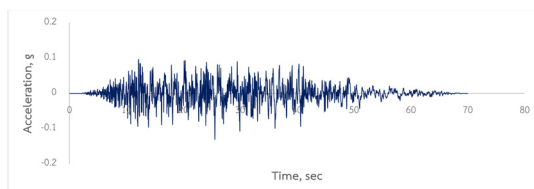
ในงานวิจัยนี้ใช้คลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 3 คลื่น ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยแต่ละคลื่นจะประกอบไปด้วยคลื่นขนานรอยเลื่อน (Fault Parallel: FP) และคลื่นตั้งฉากกับรอยเลื่อน (Fault Normal: FN) โดยแสดงตัวอย่างคลื่นตั้งฉากกับรอยเลื่อนดังรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 6

ตารางที่ 2 คลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง

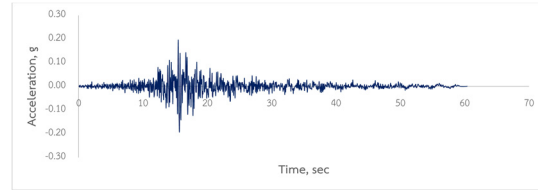
| คลื่นแผ่นดินไหว | เหตุการณ์   | ปี   | ขนาด | ระยะทาง (กม.) |
|-----------------|-------------|------|------|---------------|
| NGA880          | Landers     | 1992 | 7.28 | 26.8          |
| NGA882          | Landers     | 1992 | 7.28 | 27            |
| NGA1636         | Manjil-Iran | 1990 | 7.37 | 50            |



รูปที่ 4 คลื่นแผ่นดินไหว NGA880FN



รูปที่ 5 คลื่นแผ่นดินไหว NGA882FN

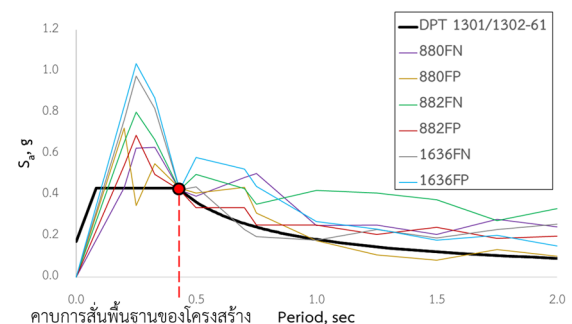


รูปที่ 6 คลื่นแผ่นดินไหว NGA1636FN

คลื่นแผ่นดินไหวแต่ละคลื่นจะถูกปรับแต่งด้วยค่าคงที่ (Scaling factor) ดังตารางที่ 3 โดยค่าคงที่แต่ละค่ามาจากการนำค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหวแต่ละคลื่นมาเปรียบเทียบกับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย ตามที่กำหนดใน มยผ. 1301/1302-61 [12] โดยคำนวณตามสมการต่าง ๆ ที่กล่าวไว้แล้ว ในหัวข้อ 2.4-2.5 จะทำให้ได้ค่าคงที่สำหรับการปรับแต่งที่ทำให้สเปกตรัมของคลื่นแต่ละคลื่นให้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ณ คาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างมีขนาดเท่ากับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ตามที่กำหนดใน มยผ. 1301/1302-61 [12] ดังรูปที่ 7

ตารางที่ 3 ค่าคงที่สำหรับปรับแต่งคลื่นแผ่นดินไหว

| คลื่นแผ่นดินไหว | ค่าคงที่สำหรับการปรับแต่ง |        |
|-----------------|---------------------------|--------|
|                 | FN                        | FP     |
| NGA880          | 2.4506                    | 2.086  |
| NGA882          | 1.9422                    | 1.5729 |
| NGA1636         | 1.3677                    | 2.5399 |



รูปที่ 7 สเปกตรัมสำหรับการออกแบบ อ. เมือง จ. สุโขทัย

## 4. ผลการศึกษา

### 4.1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ

#### 4.1.1. ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติวัดครีพิจิตกริทธิกลยาราม

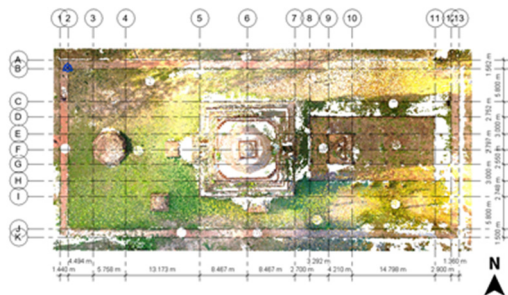
จากการเก็บข้อมูลลักษณะทางกายภาพด้วยเทคโนโลยีการสแกนวัด 3 มิติแบบภาคพื้นดินทำให้ได้ข้อมูลกลุ่มจุดพิกัด 3 มิติเป็นจำนวนมากสำหรับแต่ละจุดตั้งกล้อง เมื่อนำข้อมูลเหล่านี้มาประมวลผลเชื่อมต่อกันโดยหลักการซ้อนทับของข้อมูลจะทำให้ได้



ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ขนาดมิติ รวมถึงความโน้มเอียงของเจดีย์ได้ โดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9



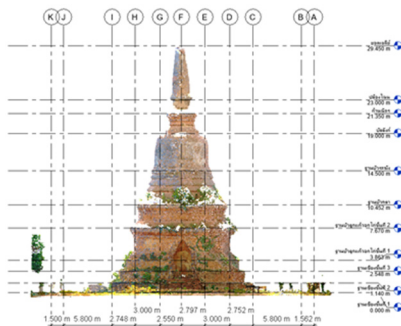
รูปที่ 8 ภาพกลุ่มจุด 3 มิติ แสดงพื้นที่โดยรวมของวัดศรีพิจิตร กิริติกลยาราม



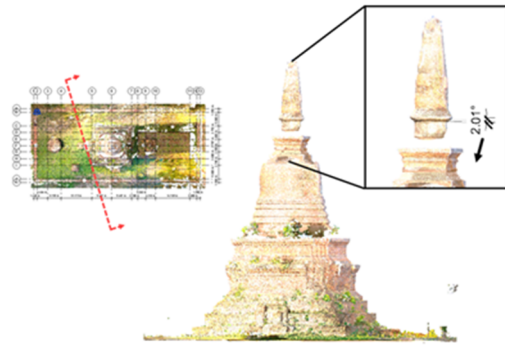
รูปที่ 9 ผังบริเวณของวัดศรีพิจิตรกิริติกลยาราม

#### 4.1.2. ผลการวิเคราะห์ขนาดมิติและความโน้มเอียงของเจดีย์

สำหรับเจดีย์ประธานมีระดับความสูงจากขอบล่างของฐานเชิงถึงปลายยอดเจดีย์ประมาณ 29.45 เมตร ดังรูปที่ 10 จากการประเมินพบว่าตั้งแต่ฐานจนถึงบริเวณก้านฉัตรที่ระดับความสูง 21.35 เมตร เจดีย์ยังมีลักษณะตรง แต่ที่ปลายยอดของเจดีย์พบว่ามีความโน้มเอียงไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ประมาณ 2.01 องศา โดยพิจารณาว่าความโน้มเอียงจากบริเวณก้านฉัตรที่ระดับความสูง 21.35 เมตร ขึ้นไปจนถึงปลายยอดเจดีย์ ดังแสดงในรูปที่ 11



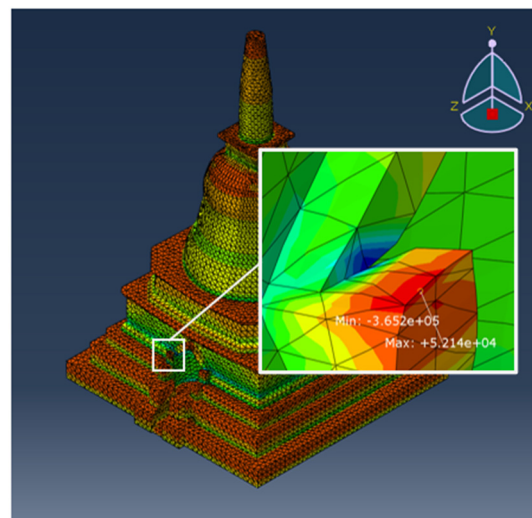
รูปที่ 10 เจดีย์ประธานมุมมองทางด้านทิศตะวันออก



รูปที่ 11 การวัดความโน้มเอียง ณ ตำแหน่งยอดของเจดีย์

#### 4.2. การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีทางสถิตยศาสตร์

ในการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีทางสถิตยศาสตร์จะพิจารณากรณีของน้ำหนักของตัวโครงสร้าง โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 1 พบว่าตำแหน่งที่เกิดหน่วยแรงสูงสุดอยู่ ณ ตำแหน่งบริเวณซุ้มสำหรับประดิษฐานพระพุทธรูป ระดับความสูงประมาณ 4 เมตร แสดงดังรูปที่ 12 โดยหน่วยแรงดึงสูงสุดและหน่วยแรงอัดสูงสุดมีค่า 0.53 กก./ซม.<sup>2</sup> และ 3.72 กก./ซม.<sup>2</sup> ตามลำดับ



รูปที่ 12 ตำแหน่งของหน่วยแรงสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักของตัวโครงสร้าง

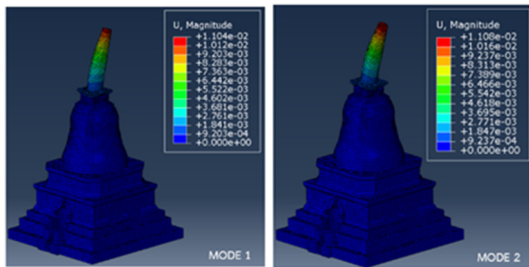
#### 4.3. การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีทางพลศาสตร์

##### 4.3.1. ความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่น

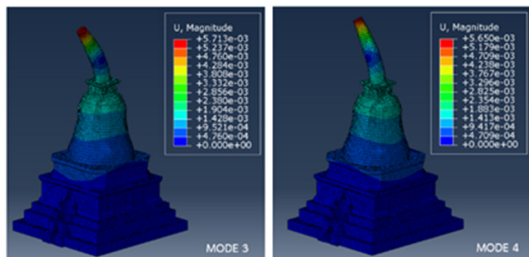
สำหรับการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นค่าความถี่ธรรมชาติ 12 โหมดแรก แสดงดังตารางที่ 4 และรูปแบบการสั่นของ 6 โหมดแรก แสดงดังรูปที่ 13 ถึงรูปที่ 15

ตารางที่ 4 ค่าความถี่ธรรมชาติของ 12 โหมดแรก

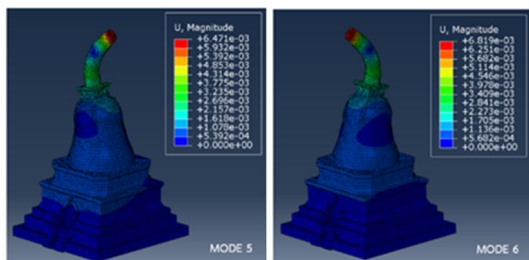
| โหมด | ความถี่ (Hz) |
|------|--------------|
| 1    | 2.3087       |
| 2    | 2.3136       |
| 3    | 3.8838       |
| 4    | 3.9284       |
| 5    | 7.7688       |
| 6    | 7.8336       |
| 7    | 8.1674       |
| 8    | 9.2343       |
| 9    | 10.854       |
| 10   | 10.903       |
| 11   | 12.907       |
| 12   | 14.579       |



รูปที่ 13 รูปร่างการสั่นของโหมดที่ 1 และโหมดที่ 2



รูปที่ 14 รูปร่างการสั่นของโหมดที่ 3 และโหมดที่ 4



รูปที่ 15 รูปร่างการสั่นของโหมดที่ 5 และโหมดที่ 6

#### 4.3.2. ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว

เนื่องจากเจดีย์ประธานวัดศรีพิจิตรกิตติกลารามมีชั้นสำหรับประดิษฐานพระพุทธรูปอยู่ทำให้มีความไม่สมมาตรอยู่เล็กน้อย และเลือกให้แรงแผ่นดินไหวในทิศทางที่มีความถี่ธรรมชาติต่ำกว่าเป็นกรณีศึกษา โดยกำหนดอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับร้อยละ 2

จากการวิเคราะห์พบว่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ปลายยอดของเจดีย์ประธานเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเคลื่อนตัวสูงสุดบริเวณปลายยอดของเจดีย์

| คลื่นแผ่นดินไหว | การเคลื่อนตัวสูงสุด (ซม.) |       |
|-----------------|---------------------------|-------|
|                 | FN                        | FP    |
| NGA880          | 15.08                     | 14.82 |
| NGA882          | 17.09                     | 11.22 |
| NGA1636         | 18.24                     | 17.01 |

#### 5. สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ เก็บข้อมูลลักษณะทางกายภาพ เพื่อประเมินขนาดมิติในสภาพปัจจุบัน และวิเคราะห์โครงสร้างเจดีย์ประธานวัดศรีพิจิตรกิตติกลาราม ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยคำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว ผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการวิเคราะห์ขนาดมิติและข้อมูลกลุ่มจุดของเจดีย์ประธานวัดศรีพิจิตรกิตติกลาราม พบว่าเจดีย์มีระดับความสูง 29.45 เมตร วัดจากขอบล่างฐานเชิงจนถึงปลายยอดของเจดีย์ มีความโน้มเอียง 2.01 องศา โดยความโน้มเอียงของเจดีย์เริ่มเกิดบริเวณก้านฉัตรที่ระดับ 21.35 เมตร ขึ้นไปจนถึงปลายยอด

2. การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีทางสถิตยศาสตร์ พบว่าหน่วยแรงโดยรวมเป็นหน่วยแรงอัด ค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดและหน่วยแรงอัดสูงสุดอยู่บริเวณซุ้มสำหรับประดิษฐานพระพุทธรูปที่ระดับความสูงประมาณ 4 เมตร วัดจากขอบล่างฐานเชิง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.53 กก./ซม.<sup>2</sup> และ 3.72 กก./ซม.<sup>2</sup> ตามลำดับ

3. ค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐานของ 2 ทิศทางที่ตั้งฉากกันในแนวราบมีค่า 2.3087 Hz และ 2.3136 Hz ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากเจดีย์ประธานมีลักษณะโดยรวมค่อนข้างสมมาตร

4. สำหรับการเคลื่อนตัวสูงสุดที่บริเวณปลายยอดของเจดีย์เนื่องจากแรงแผ่นดินไหว พบว่าคลื่นแผ่นดินไหว NGA1636 ทั้งคลื่นขนานกับรอยเลื่อนและคลื่นตั้งฉากกับรอยเลื่อน ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวที่ปลายยอดมีค่าสูงสุด เท่ากับ 18.24 เซนติเมตร และ 17.01 เซนติเมตร ตามลำดับ

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และขอขอบคุณผู้บริหารและเจ้าหน้าที่อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยสำหรับการอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลที่ใช้ในการศึกษานี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ธงชัย สาโค, อานูม มณเฑียร, ชวกานต์ ศรีสุโข, เจริญพงษ์ ชู  
นุช, ชาญชัย ศรีภักญญา, ภัทรชนก นิธิกร, และคณะ (2561).  
ทำเนียบโบราณสถานอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย ฉบับ  
ปรับปรุง พุทธศักราช ๒๕๖๑. พิมพ์ครั้งที่ 2, อุทยาน  
ประวัติศาสตร์สุโขทัย, ตำบลเมืองเก่า, อำเภอเมืองสุโขทัย,  
ประเทศไทย, 180-181.
- [2] Ebrahim M. (2016). 3D Laser Scanners: History,  
Applications and Future. *LAP LAMBERT Academic  
Publishing*, 29-30. DOI:10.13140/2.1.3331.3284
- [3] FARO Technologies, Inc., (2015). *FARO Laser Scanner  
Focus3D X 330 Manual*. FARO Technologies, Inc, Lake  
Mary, FL, USA, 42-45.
- [4] Castagnetti C., Bertacchini E., Capra A., 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*, May,  
13.
- [5] สุทัศน์ สีสาทวิวัฒน์, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัยณรงค์ อธิสกุล, รัก  
ติพงษ์ สหมิตรมงคล, และเสนต์ มหาพล. (2562). *โครงการ  
พัฒนาฐานข้อมูลทางวิศวกรรมเพื่อการประเมินและติดตาม  
สภาพโครงสร้างโบราณสถานของไทย*. สำนักงาน  
คณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม, 29-  
141.
- [6] Korumaz M., Betti M., Conti A., Tucci G., Bartoli G.,  
Bonora V., Korumaz A. G., Fiorini L. (2017). An  
integrated Terrestrial Laser Scanner (TLS), Deviation  
Analysis (DA) and Finite Element (FE) approach for  
health assessment of historical structures. A minaret  
case study. *Engineering Structures*, Elsevier,  
Amsterdam, Netherlands, 224-238.
- [7] Sairumyat P., Mahasuwanchai P., Athisakul C.,  
Leelataviwat S., Chucheeepsakul S. (2020). Application  
of 3D laser scanning technology for preservation and  
monitoring of Thai pagoda: A case study of Wat  
Krachee Ayutthaya. *IOP Conference Series: Earth and  
Environmental Science*, **463**(1). DOI:10.1088/1755-  
1315/463/1/012082
- [8] Pritchard D., Sperner J., Hoepner S., Tenschert R.  
(2017). Terrestrial laser scanning for heritage  
conservation: The Cologne Cathedral documentation  
project. *ISPRS Annals of the Photogrammetry,  
Remote Sensing and Spatial Information Sciences*  
**4**(2W2), 213-220. DOI:10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-  
213-2017
- [9] ภคพงศ์ ภัทราคม (2560), *บูรณาการการสำรวจลักษณะทาง  
กายภาพของโครงสร้างและประเมินความมั่นคงโครงสร้าง  
โบราณสถาน: กรณีศึกษาพระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล*. ดุษฎี  
นิพนธ์, สาขาวิศวกรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์,  
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [10] ณัฐยา เลิศศิวนนท์. (2552). *การศึกษาการตอบสนองต่อ  
แผ่นดินไหวของโบราณสถานอิฐก่อทรงระฆัง*. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิศวกรรมโยธา,  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [11] Adam M. A., El-Salakawy T. S., Salama M. A.,  
Mohamed A. A. (2020). Assessment of structural  
condition of a historic masonry minaret in Egypt. *Case  
Studies in Construction Materials*, Elsevier,  
Amsterdam, Netherlands
- [12] มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง. (2561). *มยผ.  
1301/1302-61 มาตรฐานการออกแบบอาคารด้านทานการ  
สั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว*. กรมโยธาธิการและผังเมือง,  
กระทรวงมหาดไทย, ประเทศไทย, 1-171.
- [13] วรศักดิ์ กนกกุลชัย. (2540). โครงการถนนพุทธบูชา:  
ผลกระทบต่อโครงสร้างองค์พระปฐมเจดีย์. *โยธาสาร* **9**(3), 51-  
56.
- [14] Wonganan N., Athisakul C., Mahasuwanchai P.,  
Tanchirapat W., Sahamitmongkol R., Leelataviwat S.  
(2020). Ancient materials and substitution materials  
used in thai historical masonry structure preservation.  
*Journal of Renewable Materials*, **9**(2), 179-204. DOI:  
10.32604/jrm.2021.013134