



บทความวิจัย

การติดตามสภาพโครงสร้างระยะยาวและการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ของปาสานเจดีย์ วัดราชประดิษฐสถิตมหาสีมาราม ราชวรวิหาร โดยอาศัยข้อมูลการสแกนวัตถุ 3 มิติ ด้วยแสงเลเซอร์

ชนาธิป บินชาฮิส พิรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย* ชัยณรงค์ อธิสกุล สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์ และ สมชาย ชูชีพสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

เชษฐัง ดิงสัญชลี

ภาควิชาประวัติศาสตร์ศิลปะ คณะโบราณคดี มหาวิทยาลัยศิลปากร

ชุตานันท์ สุดทองคง

คณะสถาปัตยกรรมและการออกแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 5537 4567 อีเมล: Peerasit.mahasu@kmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.09.016

รับเมื่อ 24 ตุลาคม 2566 แก้ไขเมื่อ 11 มกราคม 2567 ตอบรับเมื่อ 31 มกราคม 2567 เผยแพร่ออนไลน์ 20 กันยายน 2567

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการประยุกต์ใช้ข้อมูลการสแกนวัตถุ 3 มิติ เพื่อการติดตามสภาพโครงสร้างระยะยาว รวมถึงการประเมินเสถียรภาพของโครงสร้างปาสานเจดีย์วัดราชประดิษฐสถิตมหาสีมาราม ราชวรวิหาร เขตพระนคร กรุงเทพมหานคร ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ งานวิจัยนี้ดำเนินการเก็บข้อมูลดิจิทัลในรูปแบบกลุ่มจุดสามมิติใน 3 ช่วงเวลา ตั้งแต่ พ.ศ. 2563–2565 เพื่อติดตามและตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสภาพเจดีย์วัดราชประดิษฐ์ฯ ในระยะยาว ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์ขนาดมิติในสภาวะปัจจุบัน และประเมินมุมเอียงของปาสานเจดีย์ได้ รวมทั้งมีการนำเสนอวิธีการประยุกต์ใช้ข้อมูลกลุ่มจุดสำหรับการสร้างแบบจำลองสามมิติเพื่อใช้ในการประเมินเสถียรภาพของปาสานเจดีย์ด้วยโปรแกรม Abaqus โดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มจุดและมุมเอียงของเจดีย์ไม่พบการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงอย่างมีนัยสำคัญในช่วงระยะเวลาการศึกษา จากผลการกระจายหน่วยแรงของโครงสร้างภายใต้น้ำหนักเจดีย์พบว่า บริเวณที่เกิดความเค้นอัดและความเค้นดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.237 เมกะพาสคัลที่บริเวณฐานเชิง และ 0.033 เมกะพาสคัลที่บริเวณพื้นภายในปาสานเจดีย์ ตามลำดับ นอกจากนี้มีการศึกษาการเปลี่ยนสมบัติเชิงกลของวัสดุที่มีผลต่อการกระจายหน่วยแรงค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด และคาบการสั่นอิสระ ที่อาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของโครงสร้างเจดีย์ สุดท้ายนี้กระบวนการและผลการศึกษาจะเป็นประโยชน์ต่องานอนุรักษ์วัดราชประดิษฐ์ฯ ได้นในอนาคต

คำสำคัญ: การติดตามสภาพในระยะยาว วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ ด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดิน เจดีย์ วัดราชประดิษฐสถิตมหาสีมาราม ราชวรวิหาร

การอ้างอิงบทความ: ชนาธิป บินชาฮิส, พิรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย, ชัยณรงค์ อธิสกุล, สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์, สมชาย ชูชีพสกุล, เชษฐัง ดิงสัญชลี และ ชุตานันท์ สุดทองคง, “การติดตามสภาพโครงสร้างระยะยาวและการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ของปาสานเจดีย์ วัดราชประดิษฐสถิตมหาสีมาราม ราชวรวิหาร โดยอาศัยข้อมูลการสแกนวัตถุ 3 มิติ ด้วยแสงเลเซอร์,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 35, ฉบับที่ 3, หน้า 1–17, เลขที่บทความ 253-027370, ก.ค.-ก.ย. 2568.



Long-Term Monitoring and Finite Element Analysis of The Pasana Chedi Wat Ratchapradit Sathimahasimaram Ratchaworawihan based on Terrestrial Laser Scanning Data

Chanatip Binzais, Peerasit Mahasuwanchai*, Chainarong Athisakul, Sutat Leelataviwat and Somchai Chucheeepsakul
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand
Chedha Tingsanchali

Department of Art History, Faculty of Archaeology, Silpakorn University, Bangkok, Thailand

Chudanat Sudthongkhong

School of Architecture and Design, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel.09 5537 4567, E-mail: Peerasit.mahasu@kmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.09.016

Received 24 October 2023; Revised 11 January 2024; Accepted 31 January 2024; Published online: 20 September 2024

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This article presents the applications of three-dimensional laser scanning data for long-term monitoring and stability assessment using the finite element method of the Pasana Chedi, Wat Ratchapradit Sathimahasimaram Ratchaworawihan, Phra Nakhon district, Bangkok. This research collected digital data in the form of 3D point clouds over three sessions, from the year 2020 to 2022, to monitor and investigate changes in the condition of Wat Ratchapradit in the long term. The obtained data can be used to analyze the current dimensions and assess the leaning angles of the Pasana Chedi. The methodology is presented for applying point cloud data to create a three-dimensional model for assessing the stability of the Pasana Chedi using Abaqus software. The analysis of point cloud data and the leaning angles of the Chedi did not reveal any significant changes during the study sessions. According to the stress distribution result of a structure caused by the self-weight of the Chedi, the maximum compressive stress and tensile stress are 0.237 MPa at Than Keang and 0.033 MPa at the floor inside the Chedi, respectively. In addition, a study was conducted on the changes in the mechanical properties of materials that could affect the stress distribution, maximum displacement, and natural period, which might impact the stability of the Chedi. Finally, the methodology and results will benefit the future preservation of Wat Ratchapradit.

Keywords: Chedi, Finite Element Method, Long-term Monitoring, Terrestrial Laser Scanning Technology, Wat Ratchapradit Sathimahasimaram Ratchaworawihan

Please cite this article as: C. Binzais, P. Mahasuwanchai, C. Athisakul, S. Leelataviwat, S. Chucheeepsakul, C. Tingsanchali, and C. Sudthongkhong, "Long-term monitoring and finite element analysis of the Pasana Chedi Wat Ratchapradit Sathimahasimaram Ratchaworawihan based on terrestrial laser scanning data," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 3, pp. 1-17, ID. 253-027370, Jul.-Sep. 2025 (in Thai).

1. บทนำ

วัดราชประดิษฐสถิตมหาสีมาราม เป็นพระอารามหลวงชั้นเอก ชนิดราชวรวิหาร ตั้งอยู่เลขที่ 2 ถนนสราญรมย์ แขวงพระบรมมหาราชวังเขตพระนครกรุงเทพมหานครโปรตุเกสฯ ให้สถาปนาขึ้นโดยพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว เมื่อวันที่ 26 พฤศจิกายน พ.ศ. 2407 ภายในเขตพุทธาวาสประกอบหมู่อาคารสำคัญที่ตั้งอยู่บนฐานไพทีขนาดใหญ่ ได้แก่ ปาสาณเจดีย์ พระวิหารหลวง พระปรางค์ขอม หอไตร หอพระจอม ศาลาการเปรียญ และหอระฆัง [1]–[3]

ปาสาณเจดีย์ วัดราชประดิษฐสถิตมหาสีมารามราชวรวิหาร เป็นพระธาตุเจดีย์บรรจุพระบรมสารีริกธาตุ ตั้งอยู่บนฐานไพทีขนาดใหญ่ภายในเขตพุทธาวาส มีลักษณะเป็นเจดีย์ทรงระฆังฐานกลมตั้งอยู่บนฐานประทักษิณทรงสี่เหลี่ยมจำนวน 2 ชั้น จากระดับฐานไพที ภายนอกหุ้มด้วยหินอ่อนจึงเป็นที่มาของชื่อ ปาสาณเจดีย์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 [1]–[3]

การเก็บข้อมูลสภาพปัจจุบันของโครงสร้างที่เหมาะสมและแม่นยำส่งผลให้การประเมินและติดตามสภาพสามารถดำเนินการได้มีประสิทธิภาพ ขั้นตอนการเก็บข้อมูลแบบดั้งเดิมจำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้สำรวจโดยเฉพาะเมื่อเป็นการเก็บข้อมูลภายในโบราณสถาน ในประเทศไทยมีการศึกษาเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ ด้วยแสงเลเซอร์มาใช้ในการประเมินสภาพโบราณสถาน อาทิ โบราณสถานในอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา [4], [5] วัดราชพฤกษ์สถิตมหาสีมาราม [6], [7] อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ [8] อย่างไรก็ตามการศึกษเกี่ยวกับการติดตามสภาพโครงสร้างโบราณสถานในระยะยาวยังพบข้อจำกัดเมื่อเทียบกับจำนวนโบราณสถานในประเทศไทย

การประยุกต์ใช้ข้อมูลกลุ่มจุดจากเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ สามารถนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ เช่น การประเมินเสถียรภาพของโครงสร้างในสภาพปัจจุบันโดยการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อหาการเอียงตัวหรือมุมวิกฤตของโครงสร้าง [4] นอกจากนี้แบบจำลองที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นในตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดได้ รวมทั้งมีการนำไปวิเคราะห์สมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้างและผลกระทบเนื่องจากแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว [9]–[11]

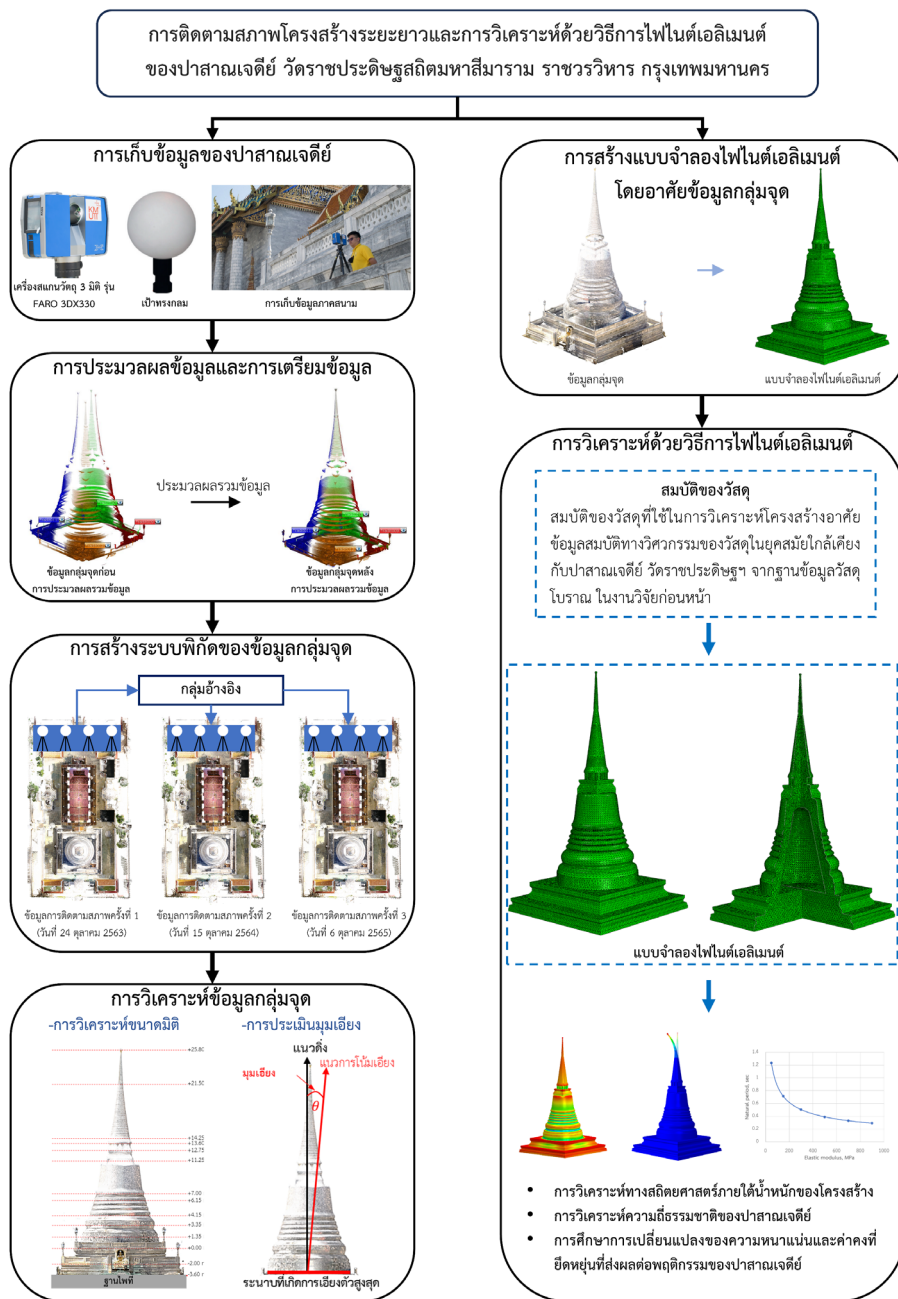


รูปที่ 1 ปาสาณเจดีย์วัดราชประดิษฐสถิตมหาสีมาราม

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอกระบวนการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ ด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดินเพื่อการติดตามสภาพโครงสร้างระยะยาว จากนั้นอาศัยการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงภายใต้น้ำหนักของปาสาณเจดีย์และวิเคราะห์รูปแบบการสั่นอิสระของปาสาณเจดีย์ พร้อมทั้งศึกษาความสัมพันธ์ของค่าคงที่ยืดหยุ่น และความหนาแน่นของวัสดุที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการรับแรงของปาสาณเจดีย์ วัดราชประดิษฐสถิตมหาสีมาราม โดยการศึกษาทำการเก็บข้อมูลกลุ่มจุด 3 ช่วงเวลา ตั้งแต่วันที่ 24 สิงหาคม พ.ศ. 2563 จนถึงวันที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2565 รวมเวลาทั้งสิ้น 773 วัน ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาองค์ความรู้ในด้านการประเมินและติดตามสภาพในระยะยาวของโบราณสถานไทย ตลอดจนเป็นฐานข้อมูลสำหรับงานด้านอนุรักษ์ปาสาณเจดีย์ วัดราชประดิษฐสถิตมหาสีมารามต่อไปในอนาคต

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการติดตามสภาพในระยะยาวของ

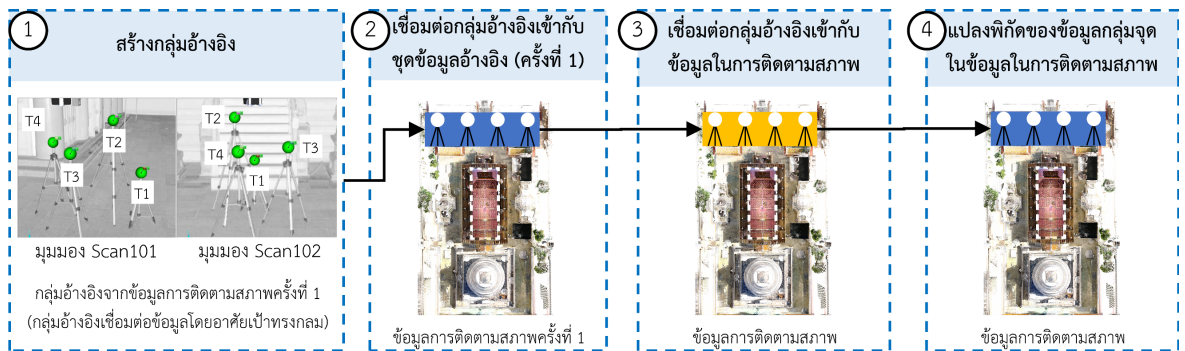


รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ปาสานเจดีย์โดยอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ ร่วมกับการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยสรุปได้ดังแผนผังในรูปที่ 2 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การเก็บข้อมูลด้วยเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ

ในขั้นตอนการเก็บข้อมูลปาสานเจดีย์ใช้เครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติ รุ่น FARO Focus3Dx330 ที่มีความแม่นยำในระดับ ± 2 มม. ในระยะ 25 ม. [12] ร่วมกับการใช้เป้าทรงกลม



รูปที่ 3 กระบวนการสร้างระบบพิกัดของข้อมูลกลุ่มจุดเพื่อใช้ในการติดตามสภาพโครงสร้างระยะยาว

มาตรฐานในการเก็บข้อมูล โดยเป่าทรงกลมนี้ใช้สำหรับการสร้างพิกัดจุดอ้างอิงในการติดตามสภาพโครงสร้างปาสานเจดีย์ในระยะยาว สำหรับการเก็บข้อมูลของโครงสร้างได้กำหนดค่าความละเอียด 28.2 ล้านจุดต่อตำแหน่ง และความเร็วในการเก็บข้อมูล 122,000 จุดต่อวินาที โดยการศึกษาได้ดำเนินการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 3 ช่วงเวลา ดังนี้ ครั้งที่ 1 เก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 24 สิงหาคม พ.ศ. 2563 ในครั้งที่ 2 เก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 15 พฤศจิกายน พ.ศ. 2564 และในครั้งที่ 3 เก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2565 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 773 วัน

2.2 การประมวลผลข้อมูล

การประมวลผลข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ ของปาสานเจดีย์ ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Faro Scene) โดยใช้วิธีการจับคู่ข้อมูลที่มีลักษณะคล้ายกันโดยพิจารณาความสอดคล้องกันหรือเข้ากันได้ที่ดีที่สุด โดยวิธีการนี้เรียกว่า Iterative Closest Point ภายหลังขั้นตอนนี้เสร็จสิ้นจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล โดยพิจารณาค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในการประมวลผลรวมข้อมูล ซึ่งควรมีค่าน้อยกว่า 8 มิลลิเมตร ตามคำแนะนำ [13] พร้อมทั้งต้องตรวจสอบขนาดมิติของข้อมูลกลุ่มจุดเทียบกับขนาดมิติที่วัดได้จากการเก็บข้อมูลในพื้นที่ เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลที่ทำการประมวลผลมีความถูกต้องแม่นยำ

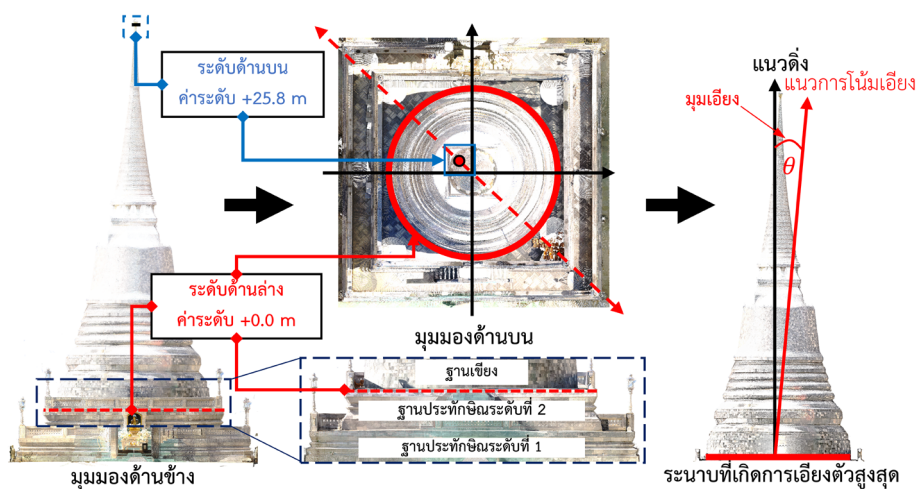
2.3 การสร้างระบบพิกัดของข้อมูลกลุ่มจุด

สำหรับการติดตามสภาพโครงสร้างในระยะยาว โดย

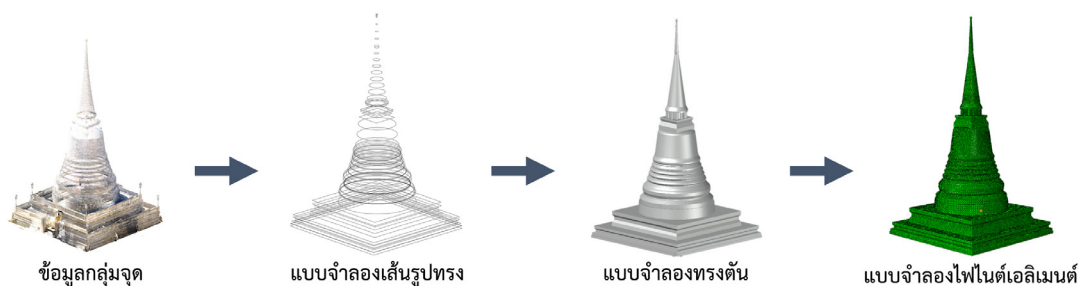
อาศัยข้อมูลกลุ่มจุดจำนวนมาก จำเป็นต้องสร้างระบบพิกัดข้อมูลกลุ่มจุดให้อยู่ในระบบพิกัดเดียวกันเพื่อให้มีความแม่นยำในการประเมินการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล การสร้างระบบพิกัดสำหรับการติดตามสภาพในระยะยาวโดยอาศัยเป่าทรงกลมเป็นจุดอ้างอิงค่าพิกัด สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3 ขั้นตอนที่ 1 ทำการเลือกกลุ่มอ้างอิงที่ประกอบด้วยข้อมูลสแกนอย่างน้อย 2 ตำแหน่งที่เก็บข้อมูลร่วมกับติดตั้งเป่าทรงกลมสำหรับอ้างอิงพิกัดอย่างน้อย 3 เป้า ดังแสดงในรูปที่ 3 จากนั้นทำการเชื่อมต่อข้อมูลสแกนเข้าด้วยกันโดยอาศัยเป่าทรงกลม ขั้นตอนที่ 2 นำข้อมูลกลุ่มอ้างอิงที่ได้ไปเชื่อมต่อกับข้อมูลกลุ่มจุดครั้งที่ 1 ด้วยวิธีการเชื่อมต่อแบบไม่ใช้เป่าเพื่อสร้างพิกัดอ้างอิงของเป่าทรงกลมเพื่อใช้ในการติดตามสภาพในครั้งต่อไป ขั้นตอนที่ 3 นำกลุ่มอ้างอิงที่ได้ไปเชื่อมต่อกับข้อมูลกลุ่มจุดในการติดตามสภาพด้วยวิธีแบบไม่ใช้เป่า เพื่อสร้างจุดอ้างอิงสำหรับการแปลงพิกัดโดยอาศัยเป่าทรงกลม ขั้นตอนที่ 4 แปลงพิกัดของเป่าทรงกลมในกลุ่มอ้างอิงที่เชื่อมต่อกับข้อมูลกลุ่มจุดในการติดตามสภาพ โดยอาศัยพิกัดจากขั้นตอนที่ 2 เมื่อแปลงระยะพิกัดแล้วเสร็จชุดข้อมูลที่ได้จะอยู่ในระบบพิกัดเดียวกันและพร้อมที่จะนำไปใช้ในการประเมินสภาพต่อไป

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มจุด

การวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ ใช้คำสั่งและเครื่องมือในโปรแกรม Autodesk Revit สำหรับการวัดขนาดมิติ และการประเมินการเอียงตัวของเจดีย์โดยกระบวนการวัดมุมเอียง



รูปที่ 4 กระบวนการวัดมุมเอียงของปาสานเจดีย์



รูปที่ 5 กระบวนการสร้างแบบจำลองจากข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ

ของปาสานเจดีย์แสดงไว้ดังรูปที่ 4 ซึ่งสรุปขั้นตอนการประเมินความเอียงของเจดีย์ดังนี้

ในขั้นแรกของการประเมินทำการกำหนดระดับฐาน และระดับยอด ในบทความนี้กำหนดระดับอ้างอิงสำหรับการวัดมุมเอียงของเจดีย์ดังนี้ ระดับฐานของเจดีย์กำหนดที่ระดับระหว่างฐานประทักษิณชั้นที่ 2 และฐานเขียงกลม โดยกำหนดให้มีค่าระดับเท่ากับ +0.00 เมตร และระดับยอดของเจดีย์กำหนดที่ระดับระหว่างส่วนบนของปลียอดและฐานของลูกแก้วยอดทรงกลมที่มีค่าระดับเท่ากับ +25.8 เมตร ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4 ต่อมาทำการหาระนาบที่เกิดการเอียงตัวสูงสุด โดยการสร้างเส้นรอบวงสมมุติที่ส่วนฐานและส่วนยอด จากนั้นทำการสร้างแนวภาพตัดขวางตามแนวระหว่างจุดกึ่งกลางของเส้นรอบวงสมมุติที่ฐานและที่ยอดของเจดีย์ ต่อมาทำการวัดการเคลื่อนตัวของจุดกึ่งกลางเจดีย์เทียบกับแนวตั้งในระดับชั้นต่าง ๆ

2.5 การสร้างแบบจำลองโดยอาศัยข้อมูลกลุ่มจุด

การสร้างแบบจำลองของปาสานเจดีย์อาศัยข้อมูลกลุ่มจุดในครั้งที่ 3 สำหรับการสร้างแบบจำลองปาสานเจดีย์วัดราชประดิษฐฯ ซึ่งมีลักษณะก่อเติมรอบองค์ไม่ได้มีการสร้างซุ้มประตูเข้าภายในองค์เจดีย์ อย่างไรก็ตามเจดีย์โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นช่องว่างภายใน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกำหนดความหนาของผนังเจดีย์เท่ากับ 1.30 เมตร โดยอาศัยสมมุติฐานความหนาของผนังพระเจดีย์วัดราชประดิษฐมหาสิมารามที่มีสัดส่วนคล้ายคลึงกับปาสานเจดีย์วัดราชประดิษฐฯ [3], [6], [7] ในการกำหนดความหนาของผนังเจดีย์ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 5 โดยขั้นแรกนำข้อมูลกลุ่มจุดเข้าสู่โปรแกรม Autodesk Revit จากนั้นทำการสร้างเส้นแสดงรูปทรงของภาพตัดขวางของเจดีย์ที่ระดับชั้น

ต่าง ๆ เมื่อสร้างเส้นแสดงรูปทรงของเจดีย์เสร็จสิ้น จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองทรงตัน (Solid Model) จากเส้นแสดงรูปทรงของเจดีย์โดยใช้โปรแกรม Autodesk AutoCAD เมื่อเสร็จสิ้นจะได้แบบจำลองในรูปแบบทรงตัน หลังจากนั้นทำการสร้างแบบจำลองโครงตาข่าย (Mesh Model) โดยในงานวิจัยนี้อาศัยการสร้างเอลิเมนต์ในโปรแกรม Abaqus ซึ่งได้กำหนดประเภทของเอลิเมนต์เป็น 4-Node Linear Tetrahedral [14], [15] โดยเอลิเมนต์ประเภทนี้สามารถสร้างแบบจำลองโครงตาข่ายที่มีความซับซ้อนได้ดีกว่าประเภทอื่น ๆ

2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

งานวิจัยนี้อาศัยข้อมูลสมบัติของอิฐก่อโบราณจากฐานข้อมูลสมบัติทางวิศวกรรมของอิฐโบราณจากรายงานวิจัยในอดีต [4], [8], [16]–[20] ดังแสดงในตารางที่ 1 ร่วมกับผลการวิจัยก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างโบราณสถานภายในประเทศไทยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการกำหนดสมบัติของวัสดุสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างโดยมีรายละเอียด ดังนี้

สมบัติของวัสดุที่ใช้ประกอบด้วย ความหนาแน่นของอิฐโบราณกำหนดโดยอาศัยข้อมูลความหนาแน่นของอิฐโบราณจากวัดราชพิพิธฯ ดังตารางที่ 1 ค่าอัตราส่วนปัวของกำหนดโดยอาศัยข้อมูลจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ซึ่งกำหนดให้มีความใกล้เคียงกับอัตราส่วนปัวของของคอนกรีต [9]–[11], [16] ค่าคงที่ยืดหยุ่นอาศัยรายงานผลการทดสอบอิฐทดแทนจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [20] กำลังรับแรงอัดของอิฐก่อโบราณอาศัยข้อมูลที่ได้จากสมการทำนายกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อโบราณที่พัฒนาไว้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [4], [17] จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปสมบัติของวัสดุสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างดังตารางที่ 2

ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม Abaqus สำหรับการประเมินความเค้นที่เกิดขึ้นภายในส่วนต่าง ๆ ของปาสานเจดีย์ในสภาวะสมดุลสถิตภายใต้น้ำหนักของโครงสร้างการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองปาสานเจดีย์ อย่างไรก็ตาม

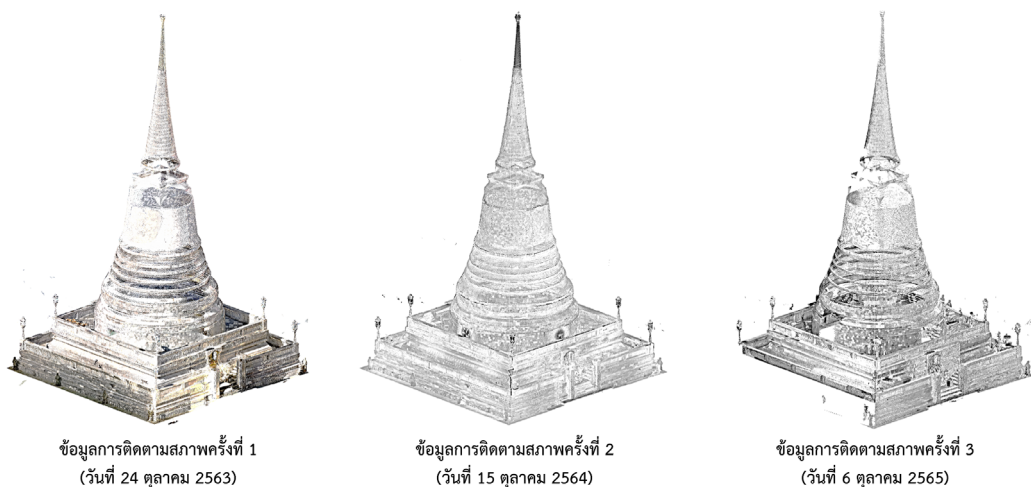
ข้อมูลสมบัติวัสดุของปาสานเจดีย์ไม่ได้มีการทดสอบอย่างชัดเจน งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของปาสานเจดีย์ อาทิ การเปลี่ยนแปลงความเค้นสูงสุด ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด คาบการสั่นพื้นฐาน โดยอาศัยข้อมูลจากฐานข้อมูลดังตารางที่ 1 ร่วมกับสมการทำนายค่าคงที่ยืดหยุ่น [17] ในการกำหนดขอบเขตของตัวแปรที่การศึกษา

ตารางที่ 1 ฐานข้อมูลอิฐโบราณของไทย [4], [8], [16]–[20]

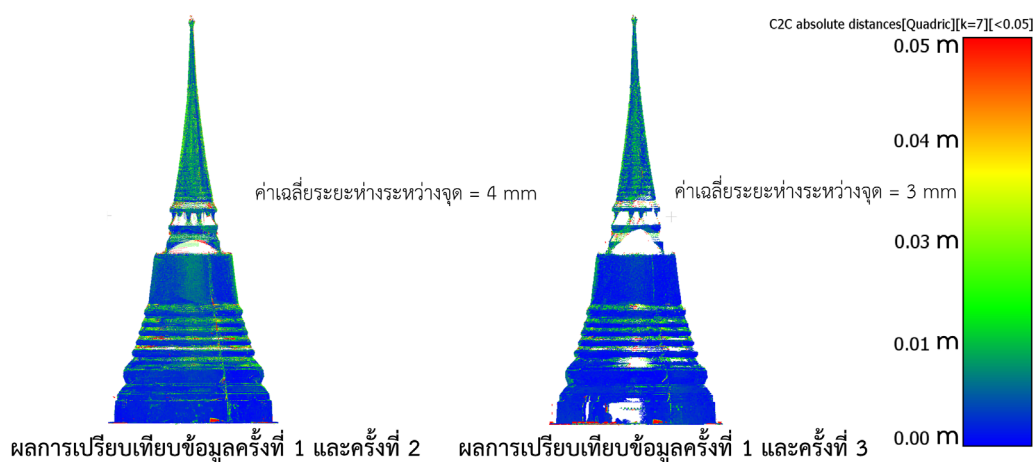
สถานที่	ความหนาแน่น (g/cm ³)	กำลังรับแรงอัดของอิฐ แบบลูกบาศก์ (ksc)
วัดไชยวัฒนาราม	1.63	22.80
วัดพระศรีสรรเพชญ์	1.78	37.00
วัดศาลापูน	1.51	27.50
พระราชวังโบราณ	1.86	22.00
ภูเขาทอง	-	51.61
เวียงนครเกษม	1.47	35.40
วัดราชพิพิธฯ	1.40	25.10
วัดท่าตอ	1.64	30.80
วัดกระเจี	1.57	67.20
วัดบ้านลุมพลี	1.37	40.12
วัดขุนแสน	1.40	57.19
วัดหน้าพระเมรุ	1.36	39.54
วัดพระราม	1.46	37.58
วัดกุฎีดาว	1.46	44.01
วัดสมณโกฏิ	1.48	50.12
วัดวรเชษฐาราม	1.39	49.97
ป้อมเพชร	1.32	39.60
วัดป่าสัก	1.44	68.13
วัดพระธาตุจอมกิตติ	1.51	41.12
วัดพระธาตุเจดีย์หลวง	1.63	208.70

ตารางที่ 2 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

ความหนาแน่น	1,400 kg/m ³
อัตราส่วนปัวของ	0.216
ค่าคงที่ยืดหยุ่น	444 MPa
กำลังอัดแรงอัดของอิฐก่อ	15.1 MPa



รูปที่ 6 ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ ของปราสาทเจดีย์



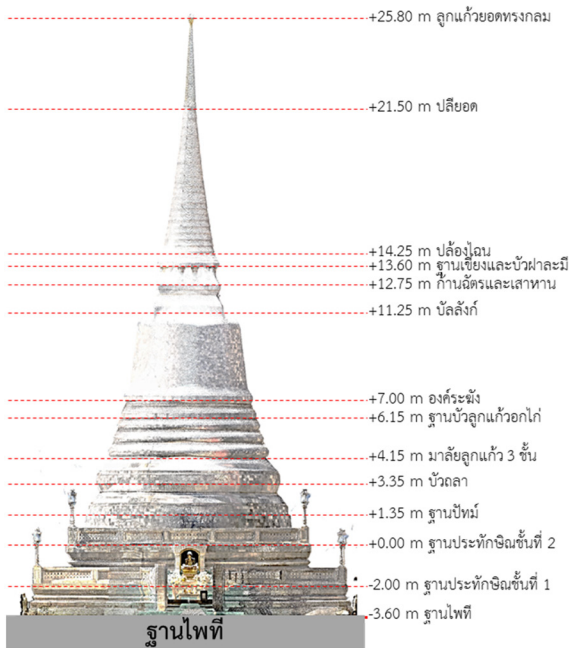
รูปที่ 7 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลกลุ่มจุด

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

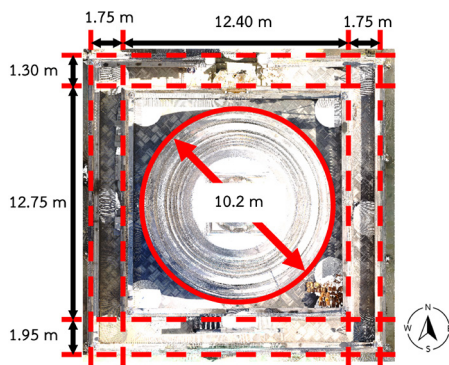
3.1 ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ ของปราสาทเจดีย์

รูปที่ 6 แสดงข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ ของปราสาทเจดีย์ วัดราชประดิษฐสถิตมหาสีมาราม ราชวรวิหาร ที่ได้จากเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ ในช่วงเวลาการติดตามสภาพโครงสร้างใน 3 ช่วงเวลา โดยค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในการเชื่อมต่อข้อมูลทั้ง 3 ครั้ง มีค่าเท่ากับ 3.1 มิลลิเมตร 3.0 มิลลิเมตร และ 1.4 มิลลิเมตร ตามลำดับซึ่งน้อยกว่าค่าการเคลื่อนสูงสุดที่แนะนำในขั้นตอนการประมวลผล [13] ต่อมาข้อมูลกลุ่มจุดในแต่ละช่วงเวลานำไปวิเคราะห์ความ

แตกต่างระหว่างชุดข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Cloud Compare จากรูปที่ 7 แสดงผลการวิเคราะห์ระยะห่างจุดของชุดข้อมูลครั้งที่ 1 เทียบกับชุดข้อมูลในการติดตามสภาพพบว่า ส่วนองค์ระฆัง ฐานปัทม์ และฐานเขียงมีระยะห่างระหว่างจุดน้อยกว่า 1 เซนติเมตร นอกจากนี้จากข้อมูลกลุ่มจุดบางส่วนของบัวถลา มาลัยลูกแก้ว ฐานบัวลูกแก้วอกไก่ บัลลังก์ ปล้องไฉน และปลียอดมีระยะห่างอยู่ในช่วง 1.0 ถึง 3.5 เซนติเมตร แต่เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างจุดจากผลการเปรียบเทียบข้อมูลทั้ง 3 ชุด พบว่า ค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างจุดเท่ากับ 4 และ 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่า



รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์ความสูงของปาสานเจดีย์



รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์ขนาดมิติมุมมองด้านบน

น้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการเชื่อมต่อข้อมูล [13] ในช่วงเวลาเดียวกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าไม่พบการเปลี่ยนแปลงของปาสานเจดีย์ในระยะเวลาที่ทำการศึกษา

3.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดมิติของปาสานเจดีย์

จากรูปที่ 8 และรูปที่ 9 แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดมิติของปาสานเจดีย์ โดยมีการกำหนดระดับอ้างอิง +0.00 เมตร ที่ระดับระหว่างฐานประทักษิณชั้นที่ 2 และองค์เจดีย์

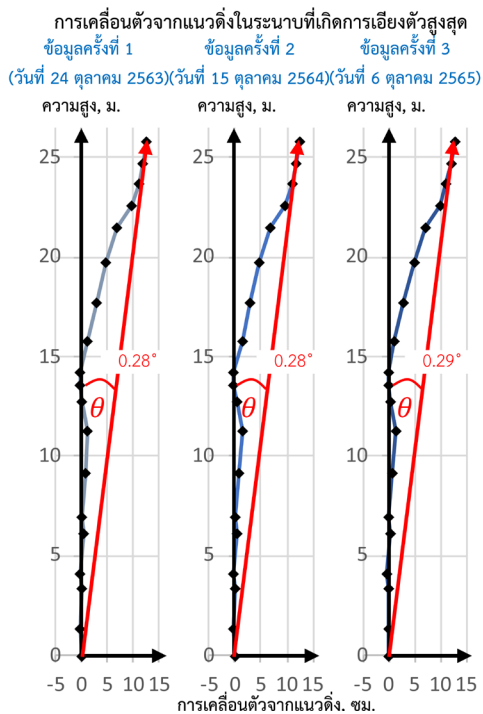
ผลการวัดความสูงจากฐานโพธิ์ถึงระดับฐานลูกแก้วยอดทรงกลมเท่ากับ 29.4 เมตร โดยแบ่งเป็นฐานประทักษิณชั้นที่ 1 มีความสูง 1.6 เมตร และชั้นที่ 2 มีความสูง 2 เมตร และองค์เจดีย์มีความสูงจากฐานประทักษิณชั้นที่ 2 จนถึงฐานของลูกแก้วยอดเท่ากับ 25.8 เมตร โดยฐานประทักษิณชั้นที่ 1 มีขนาด 15.9×16.0 เมตร และฐานประทักษิณชั้นที่ 2 มีขนาด 12.4×12.75 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของฐานเชิงกลมเท่ากับ 10.2 เมตร

3.3 ผลการติดตามการโน้มเอียงของปาสานเจดีย์

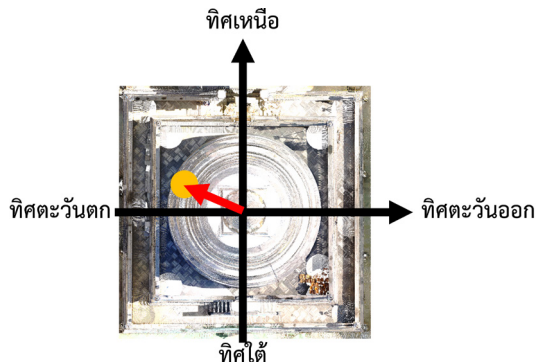
รูปที่ 10 และรูปที่ 11 แสดงผลการติดตามการโน้มเอียงของปาสานเจดีย์ในระนาบที่เกิดการเอียงตัวสูงสุดที่ระดับชั้นความสูงต่าง ๆ พบว่า มุมเอียงของปาสานเจดีย์ใน พ.ศ. 2563 จนถึง พ.ศ. 2565 มีค่าเท่ากับ 0.28 องศา 0.28 องศา และ 0.29 องศา ตามลำดับ โดยปาสานเจดีย์เอียงไปในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือจริง อย่างไรก็ตามการวัดขนาดความเอียงของเจดีย์มีโอกาสที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มีการวัดความเอียงของเจดีย์โดยผู้วิจัยจำนวน 9 คน โดยทำการประเมินความเอียงตัวของเจดีย์ด้วยข้อมูลชุดเดียวกัน ซึ่งจากผลการวัดพบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณ ± 0.02 องศา ดังนั้นจากผลการศึกษาจึงสรุปได้ว่าไม่พบการเปลี่ยนทั้งขนาดและทิศทางการโน้มเอียงของปาสานเจดีย์ตลอดระยะเวลาที่ศึกษา อย่างไรก็ตามการติดตามสภาพควรดำเนินการอย่างต่อเนื่อง

3.4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ ของปาสานเจดีย์ใน พ.ศ. 2565 ซึ่งมีการเอียงตัวเท่ากับ 0.29 องศา และอาศัยความหนาของผนังจากเจดีย์วัดราชนพิพิธที่มีสัดส่วนใกล้เคียงกัน [3] ในการสร้างช่องว่างภายในเจดีย์ โดยกำหนดความหนาของผนังเท่ากับ 1.3 เมตร และกำหนดจุดรองรับที่ฐานประทักษิณชั้นที่ 1 เป็นแบบยึดแน่น โดยแสดงภาพแบบจำลองดังรูปที่ 12 จากการคำนวณปริมาตรพบว่า แบบจำลองมีปริมาตรเท่ากับ 996.447 ลูกบาศก์เมตร และเมื่อคำนวณน้ำหนักของแบบจำลองด้วย



รูปที่ 10 ผลการติดตามสภาพมุมเอียงของปาสามเจดีย์



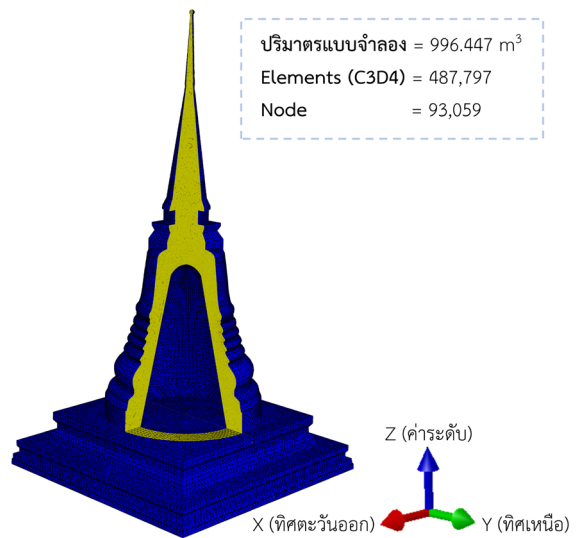
รูปที่ 11 ทิศทางการโน้มเอียงของเจดีย์

ความหนาแน่นดังตารางที่ 2 พบว่า แบบจำลองของเจดีย์มีน้ำหนักเท่ากับ 1.369×10^7 นิวตัน

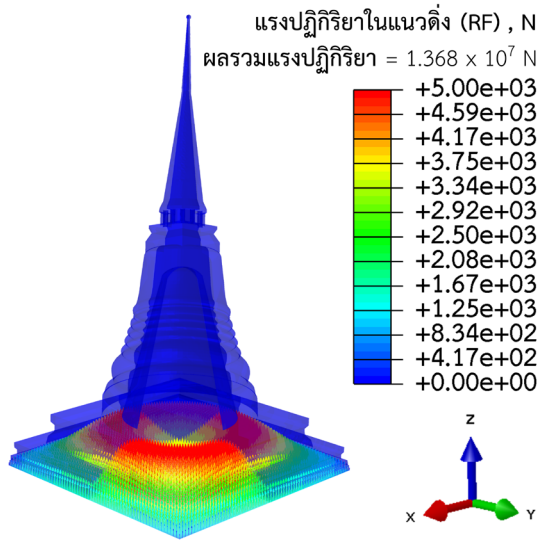
3.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางสถิตยศาสตร์

การวิเคราะห์โครงสร้างเจดีย์ในสภาวะสมดุลสถิตภายใต้น้ำหนักของโครงสร้าง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

แรงปฏิกิริยา (Reaction Force) ในแนวตั้งที่จตุรรองรับ



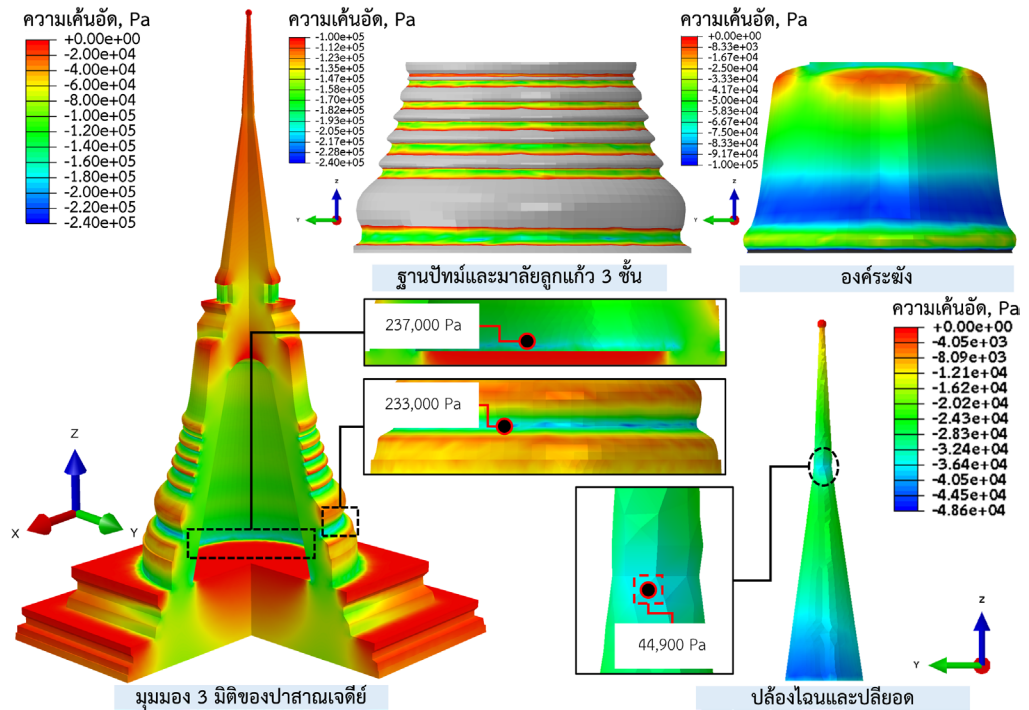
รูปที่ 12 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของปาสามเจดีย์



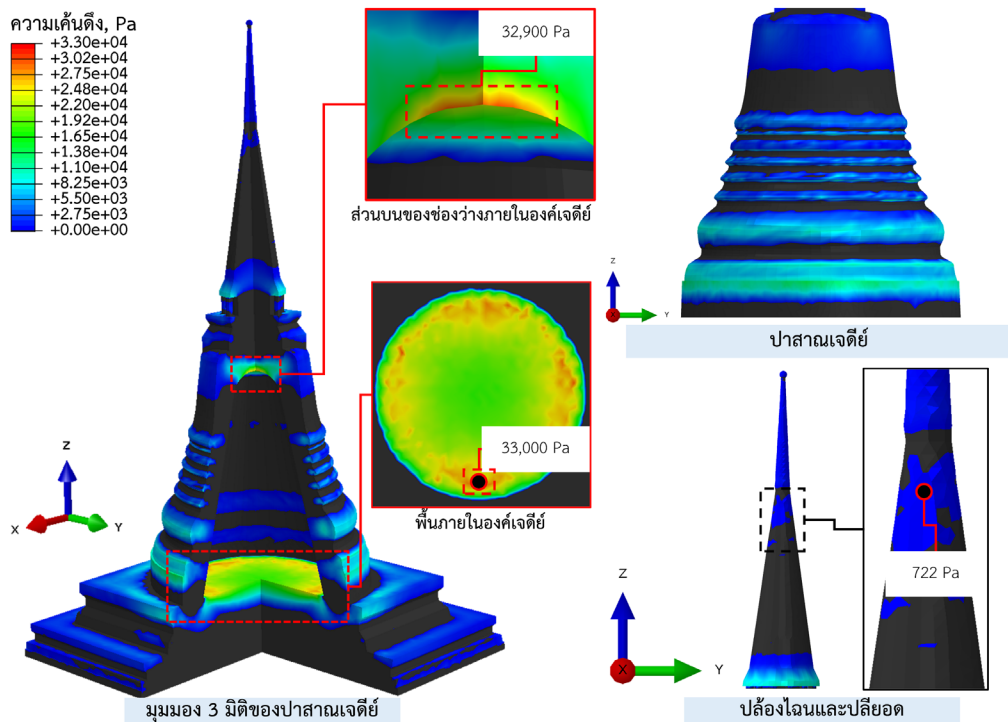
รูปที่ 13 แรงปฏิกิริยาที่จตุรรองรับ

ของปาสามเจดีย์บริเวณฐานประตักซิมชั้นที่ 1 แสดงได้ดังรูปที่ 13 โดยมีผลรวมแรงปฏิกิริยาเท่ากับ 1.368×10^7 นิวตัน เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับน้ำหนักของโครงสร้างที่คำนวณได้จากความหนาแน่นและปริมาตรของแบบจำลองพบว่า ผลรวมแรงปฏิกิริยาในแนวตั้ง จากผลการวิเคราะห์ที่มีค่าสอดคล้องกับน้ำหนักของแบบจำลอง

รูปที่ 14 แสดงการกระจายความเค้นอัดหลัก ซึ่งพบว่า



รูปที่ 14 ความเค้นอัดหลัก (Principal Compressive Stress)



รูปที่ 15 ความเค้นดึงหลัก (Principal Tensile Stress)

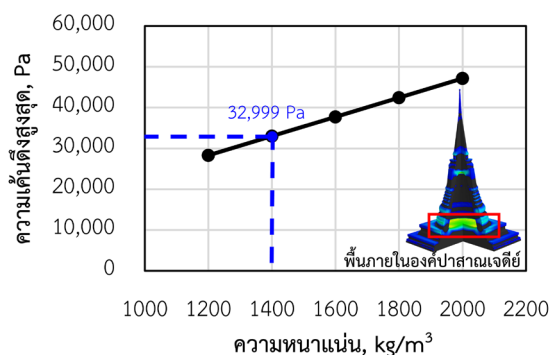
เกิดค่าสูงสุดที่บริเวณฐานเชิงทรงกลมบริเวณใกล้กับฐานประทักษิณชั้นที่ 2 และบริเวณส่วนที่คอดของฐานปัทม์ โดยมีความเค้นอัดอยู่ในช่วง 180,000–237,333 พาสคัล เมื่อพิจารณาส่วนคอดของมัลย์ลูกแก้ว 3 ชั้น และฐานบัวลูกแก้วอกไก่พบว่า เกิดความเค้นอัดอยู่ในช่วง 100,000–180,000 พาสคัล ซึ่งความเค้นในส่วนดังกล่าวมีค่าสูงกว่าส่วนอื่นของปาสานเจดีย์

จากรูปที่ 15 แสดงการกระจายตัวของความเค้นดึงหลักที่เกิดขึ้นในส่วนต่าง ๆ ของปาสานเจดีย์ โดยความเค้นดึงสูงเกิดขึ้นบริเวณพื้นภายในช่องว่างในองค์เจดีย์และส่วนบนของช่องว่างภายในปาสานเจดีย์โดยมีค่าเท่ากับ 32,999 พาสคัล และ 32,927.3 พาสคัล ตามลำดับ

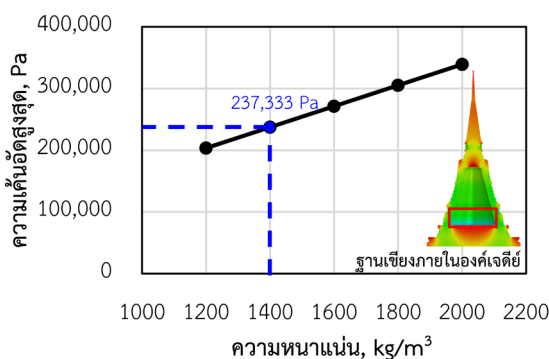
จากรูปที่ 14 และรูปที่ 15 พบว่า ส่วนบนของปล้องโณนฝั่งทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (ทิศการโน้มเอียง) เกิดความเค้นอัดสูงสุดเท่ากับ 44,910.8 พาสคัล และฝั่งทิศทางตรงข้ามหรือฝั่งทิศตะวันออกเฉียงใต้เกิดความเค้นดึงเท่ากับ 721.7 พาสคัล ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดความเค้นเนื่องจากโมเมนต์บริเวณส่วนปล้องโณนและปลียอดที่เกิดการเอียงตัวไปยังทิศตะวันตกเฉียงเหนือ

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของวัสดุและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นกับปาสานเจดีย์แสดงได้ดังรูปที่ 16 การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของวัสดุส่งผลให้ความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นในช่วงที่ศึกษาพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้นร้อยละ 66.7 ในทั้งสองทิศทาง เมื่อพิจารณาความหนาแน่นเท่ากับ 1,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่า ความเค้นดึงมีค่าเท่ากับ 32,999 พาสคัล ดังแสดงไว้ในรูปที่ 16 (ก) และความเค้นอัดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 237,333 พาสคัล ดังแสดงไว้ในรูปที่ 16 (ข)

เมื่อนำความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นมาพิจารณาร่วมกับกำลังของวัสดุสามารถวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยได้โดยอาศัยกำลังอัดของอิฐก่อโบราณที่ได้จากสมการทำนาย [4], [17] และกำลังดึงของอิฐก่อโบราณมีค่าร้อยละ 5–10 ของกำลังอัด รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของวัสดุและอัตราส่วนความปลอดภัย การเพิ่มขึ้น

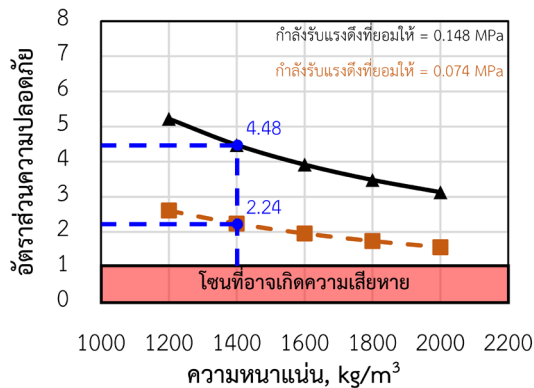


(ก) ความเค้นดึงสูงสุดบริเวณพื้นภายในปาสานเจดีย์

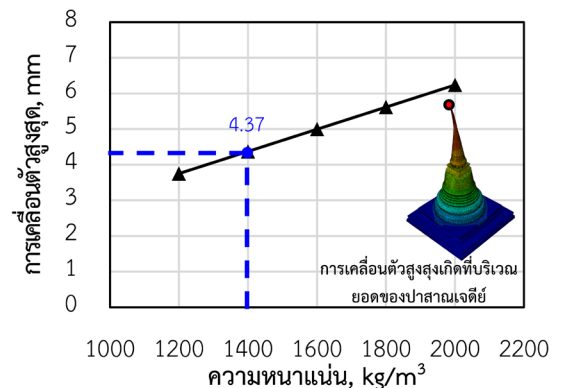


(ข) ความเค้นอัดสูงสุดบริเวณฐานเชิงภายในปาสานเจดีย์
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของวัสดุและความเค้นสูงสุด

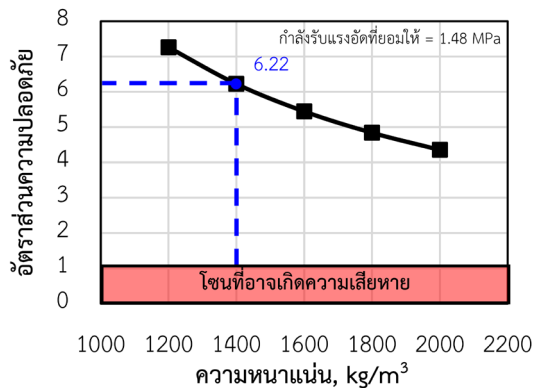
ของความหนาแน่นส่งผลให้อัตราส่วนความปลอดภัยของโครงสร้างลดลง เมื่อพิจารณาความหนาแน่นเท่ากับ 1,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่า อัตราส่วนความปลอดภัยในด้านความเค้นดึงมีค่าอยู่ในช่วง 2.24 ถึง 4.48 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 17 (ก) และอัตราส่วนความปลอดภัยในด้านความเค้นอัดมีค่าเท่ากับ 6.22 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 17 (ข) จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของวัสดุและความเค้น เมื่อนำความเค้นมาพิจารณาร่วมกับกำลังของวัสดุได้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของวัสดุและอัตราส่วนความปลอดภัย ซึ่งในอนาคตหากมีการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโบราณจากวัดประดิษฐ์สถิตมหาสีมาราม ความสัมพันธ์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถใช้ในการประเมินเสถียรภาพในเบื้องต้นของปาสานเจดีย์ได้ จากการศึกษาความสัมพันธ์



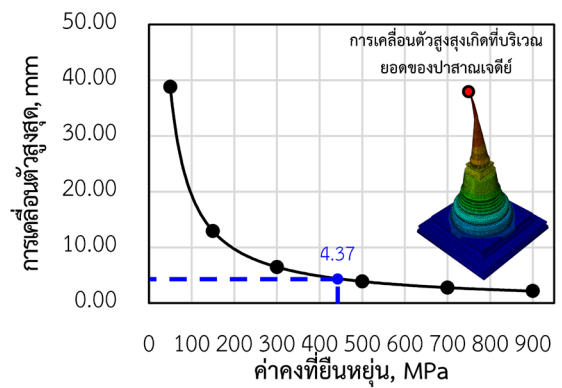
(ก) ความเค้นดิ่งสูงสุดบริเวณส่วนบนภายในปาสานเจดีย์



(ก) ความหนาแน่น



(ข) ความเค้นอัดสูงสุดบริเวณฐานเชิงภายในปาสานเจดีย์



(ข) ค่าคงที่ยึดหยุ่น

รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของวัสดุและอัตราส่วนความปลอดภัย

รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของวัสดุและการเคลื่อนตัวสูงสุดภายใต้น้ำหนักโครงสร้าง

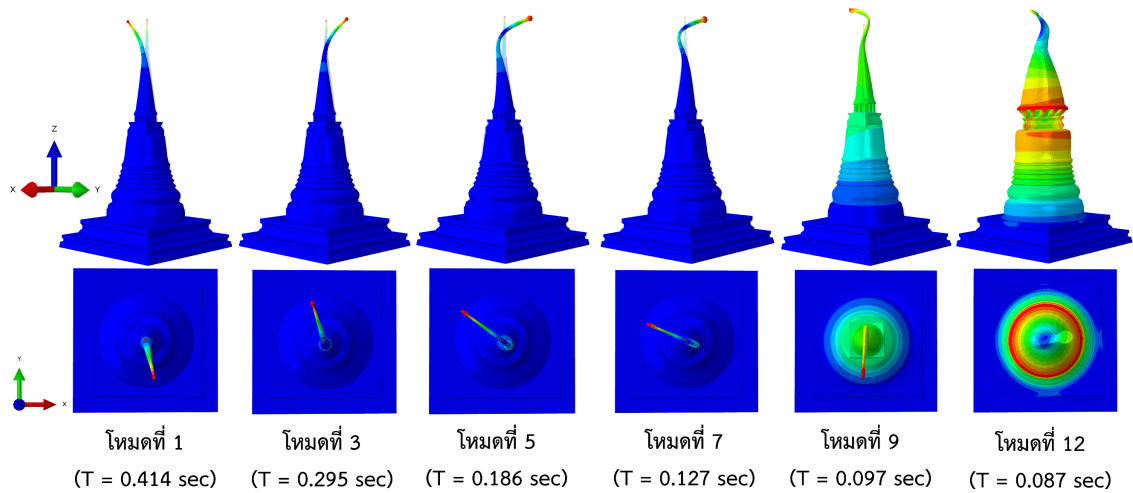
ของสมบัติของวัสดุและค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดภายใต้น้ำหนักโครงสร้างแสดงผลได้ดังรูปที่ 18 การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นส่งผลให้การเคลื่อนตัวสูงสุดภายใต้น้ำหนักโครงสร้างเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 18 (ก) ในทางกลับกันการเพิ่มขึ้นของค่าคงที่ยึดหยุ่นส่งผลให้ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดภายใต้ น้ำหนักของโครงสร้างมีค่าลดลงอย่างมากในช่วงที่ค่าคงที่ยึดหยุ่นมีค่าน้อยกว่า 300 เมกะพาสคัล ดังแสดงไว้ในรูปที่ 18 (ข) เมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นเท่ากับ 1,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าคงที่ยึดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 444 เมกะพาสคัลพบว่า ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดมีค่าเท่ากับ 4.37 มิลลิเมตร จากค่าการเคลื่อนตัวจากการวิเคราะห์โครงสร้างพบว่า มีค่า

น้อยเมื่อเทียบกับมุมเอียงในสภาวะปัจจุบันของปาสานเจดีย์

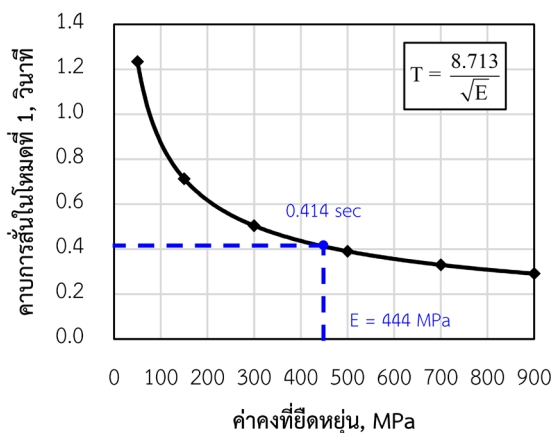
3.6 ผลการวิเคราะห์คาบการสั่นธรรมชาติ

รูปที่ 19 แสดงรูปแบบการสั่นอิสระและคาบการสั่นของปาสานเจดีย์ในโหมดต่าง ๆ โดยค่าการสั่นของคาบพื้นฐานหรือคาบการสั่นในโหมดที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.414 วินาที โดยเคลื่อนที่ในทิศทาง -Y หรือทางทิศใต้ของปาสานเจดีย์

รูปที่ 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ยึดหยุ่นในหน่วยเมกะพาสคัลและคาบการสั่นในโหมดที่ 1 ในหน่วยวินาทีพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่าคงที่ยึดหยุ่นส่งผลให้คาบพื้นฐานมีค่าลดลงอย่างมากในช่วงค่าคงที่ยึดหยุ่นมีค่าน้อย และ



รูปที่ 19 คาบการสั่นธรรมชาติของปาสานเจดีย์



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ยืดหยุ่น

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ยืดหยุ่นเท่ากับ 444 เมกะพาสคัล พบว่าค่าคาบพื้นฐานของปาสานเจดีย์มีค่าเท่ากับ 0.414 วินาที จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 20 แสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ยืดหยุ่นส่งผลต่อการวิเคราะห์ค่าคาบการสั่นของโครงสร้าง และการวิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว นอกจากการทดสอบค่าคงที่ยืดหยุ่นของวัสดุแล้ว ทั้งนี้เพื่อให้แบบจำลองมีความสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงมากขึ้นเราอาจพิจารณาตรวจสอบค่าการสั่นของปาสานเพิ่มเติมในอนาคต ดังแสดงไว้ในรายงานการวิจัยของภคพงศ์ [5], [21]

4. สรุป

การศึกษานี้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ ด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดินร่วมกับวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการติดตามสภาพในระยะยาวของปาสานเจดีย์ วัดราชประดิษฐสถิตมหาสีมาราม ราชวรวิหาร ในช่วง พ.ศ. 2563 จนถึง พ.ศ. 2565 โดยข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ และกระบวนการในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการติดตามสภาพในระยะยาวได้อย่างแม่นยำ ซึ่งมุมมองของปาสานเจดีย์ที่วัดได้ในการสำรวจครั้งที่ 1 วัดมุมเอียงได้ 0.28 องศา และจากการติดตามสภาพปาสานเจดีย์อย่างต่อเนื่องในครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ไม่พบการเปลี่ยนแปลงมุมและทิศทางการโน้มเอียงเพิ่มอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามการติดตามสภาพควรดำเนินการอย่างต่อเนื่องเพื่ออนุรักษ์โบราณสถานต่อไป

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยอาศัยแบบจำลองที่สร้างจากข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ พบว่าบริเวณที่เกิดความเค้นอัดสูงสุด คือ บริเวณฐานเชิง โดยมีค่าความเค้นอัดเท่ากับ 0.24 เมกะพาสคัล และบริเวณที่เกิดความเค้นดึงสูงสุด คือ บริเวณพื้นภายในปาสานเจดีย์ โดยมีความเค้นดึงเท่ากับ 0.033 เมกะพาสคัล โดยที่ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยในด้านแรงอัดมีค่าเท่ากับ 6.22 และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยในด้านแรงดึงมีค่าอยู่ในช่วง

2.24-4.48 เมื่อพิจารณาค่ากำลังรับแรงดิ่งที่ยอมให้ในช่วงร้อยละ 5-10 ของกำลังรับแรงอัด

ผลการวิเคราะห์การสันนิษฐานของแบบจำลองปาสานเจติย์พบว่า ค่าคาบการสั่นพื้นฐานมีค่าเท่ากับ 0.414 วินาทีไปทางทิศใต้และทางทิศตะวันออก ตามลำดับ จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของวัสดุและพฤติกรรมของโครงสร้างปาสานเจติย์พบว่า ความหนาแน่นของวัสดุที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ความเค้นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเค้นสูงสุดส่งผลให้อัตราส่วนความปลอดภัยของปาสานเจติย์มีค่าลดลง นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของวัสดุส่งผลให้ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่บริเวณยอดของปาสานเจติย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่ในทางกลับกันการเพิ่มขึ้นของค่าคงที่ยืดหยุ่นส่งผลให้การเคลื่อนตัวสูงสุดและค่าคาบการสั่นพื้นฐานของปาสานเจติย์มีค่าลดลง ทั้งนี้ในการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองโครงสร้างจำเป็นต้องใช้ข้อมูลขนาดมิติและสมบัติของวัสดุที่มีความสอดคล้องกับความเป็นจริง ดังนั้นในอนาคตอาจพิจารณาตรวจสอบค่าการสั่นของปาสานเจติย์เพื่อนำมาใช้สร้างแบบจำลองที่มีความสอดคล้องกับความเป็นจริงมากขึ้น ท้ายที่สุดนี้กระบวนการติดตามสภาพที่ได้ในบทความนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโบราณสถานแห่งอื่นได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ภายใต้แผนกลยุทธ์ สัญญาเลขที่ CE-KMUTT 6208 และทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ทุนสนับสนุนด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 (เทคโนโลยีการก่อสร้างขั้นสูงและยั่งยืนสำหรับ Thailand 4.0) และขอขอบคุณวัดราชประดิษฐสถิตมหาสีมาราม ราชวรวิหารที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Department of Religious Affairs, Ministry of Culture, *Phra A-ram Luang* vol. 1., 2nd ed.

Bangkok, Thailand: The Agricultural cooperative printing demonstrations of Thai Ltd., 2021, pp. 70-75 (in Thai).

[2] W. Osatharom, "A review of Ratchapradit Pipittatsana," *Journal of Fine Arts*, vol. 4, no. 1, pp. 364-378, 2013 (in Thai).

[3] S. Saisingha, "Stupas in Thailand Vol. 2," Silpakorn University Research, Innovation and Creativity Adminsration Office, Bangkok, 2015 (in Thai).

[4] S. Leelataviwat, W. Tangchirapat, C. Athisakul, and R. Sahamitmongkol, "Development of engineering database for assessment and structural health monitoring of thailand historic sturcture," Thailand Research Fund, Bangkok, 2019 (in Thai).

[5] B. Bhadrakom, "Integrated measures for geometric documentation and structural performance assessment of ancient heritage monuments: A case study of Phra Chedi Wat Yai Chai Mongkol," Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Bangkok, 2018 (in Thai).

[6] C. Athisakul, S. Leelataviwat, P. Mahasuwanhai, S. Thonket, C. Binzait, S. Nithipatikhom, and S. Kaewmakoon, "Application of 3D laser scanning technology for assessment and structural health monitoring of Thai Chedi: A case study of Wat Rajabophit," National Research Council of Thailand, Bangkok, 2020 (in Thai).

[7] S. Thonket, P. Mahasuwanhai, N. Wonganan, C. Binzait, S. Nithipatikhom, S. Kaewmakoon, C. Athisakul, W. Tangchirapat, and S. Leelataviwat, "3D Laser scanning data and masonry



- materials properties of Wat Ratchabophit Sathitmahasimaram Ratchaworawihan,” in *Proceedings the 25th National Convention on Civil Engineering*, Chonburi, 2020, pp. 1–8 (in Thai).
- [8] C. Athisakul, S. Leelataviwat, W. Tangchirapat, and R. Sahamitmongkol, “Development of digital database for engineering assessment and structural health monitoring of Thai Pagodas in Ayutthaya historical park,” PMU-B, Bangkok, 2019 (in Thai).
- [9] S. Kaewmakoon, P. Mahasuwanchai, C. Athisakul, and S. Leelataviwat, “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,” in *Proceedings the 26th National Convention on Civil Engineering*, Online conference, 2021, pp. 1–8 (in Thai).
- [10] S. Suksila, P. Mahasuwanchai, C. Athisakul, and S. Leelataviwat, “Terrestrial laser scanning data and seismic analysis of Wat Mahathat Sukhothai Pagoda,” in *Proceedings the 26th National Convention on Civil Engineering*, Online conference, pp. 1–8, 2021 (in Thai).
- [11] T. Jinanusorn, P. Mahasuwanchai, S. Kaewmakoon, C. Athisakul, and S. Leelataviwat, “3D laser scanning data and finite element analysis of Wat Phra Ram,” in *Proceedings the 27th National Convention on Civil Engineering*, Phuket, pp. 1–9, 2022 (in Thai).
- [12] Faro Laser Scanner Focus3d X330 Manual, FARO Technologies, Lake Mary, FL, 2022.
- [13] Scene Classic 2019.2 User Manual, FARO Technologies, Lake Mary, FL, 2019.
- [14] Dassault Systèmes Simulia Crop. (2014). Getting Started with Abaqus. Dassault Systèmes Simulia Crop. [Online] Available: <http://130.149.89.49:2080/v6.14/books/gsa/default.htm>
- [15] Dassault Systèmes Simulia Crop. (2014). Abaqus Theory Guide. Dassault Systèmes Simulia Crop. [Online] Available: <http://130.149.89.49:2080/v6.14/books/stm/default.htm>
- [16] S. Phansuwan, W. Chatrakul Na Ayuddhaya, and A. Saengnikorn, “Structural system and behavior of masonry historic pagoda,” The Fine Arts Department, Bangkok, 2018 (in Thai).
- [17] S. Tohsirimongkol, “Mechanical properties of ancient and substitution bricks for Thai historical structures preservation,” M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 2020 (in Thai).
- [18] S. Nithipatikhom, S. Tohsirimongkol, C. Athisakul, W. Tangchirapat, S. Leelataviwat, and P. Mahasuwanchai, “Compressive strength and elastic constant of the ancient and substitution masonry Prisms,” in *Proceedings the 26th National Convention on Civil Engineering*, Online conference, 2021, pp. 1–8 (in Thai).
- [19] C. Phansangud, P. Mahasuwanchai, K. Jintrakham, W. Tangchirapat, C. Athisakul, and S. Leelataviwat, “Mechanical properties of ancient bricks and compressive strength of substitution masonry for ancient building preservation in Chiang Sean,” presented at the 27th National Convention on Civil Engineering, Phuket, Thailand, May. 24–26, 2023 (in Thai).
- [20] N. Wonganan, C. Athisakul, P. Mahasuwanchai, W. Tangchirapat, R. Sahamitmongkol, and



S. Leelataviwat, "Ancient materials and substitution materials used in Thai Historical Masonry Structure Preservation," *Journal of Renewable Materials*, vol. 9, no. 2, pp. 179–204, 2021.

[21] B. Bradrakom, and N. Poovarodom, "Dynamic Investigation of the Main Stupa of Wat Yai Chaimongkol, Ayutthaya," *Thai Science and Technology Journal*, vol. 25, no. 4, pp. 1–13, 2017 (in Thai).