

การตรวจสอบแบบจำลองโครงสร้างเจดีย์วัดชินอรามวรวิหาร*

STRUCTURAL MODEL VERIFICATION OF WAT CHINORASARAM WORAWIHAN PAGODA

ศิริเดช สุธี

Siradech Surit

เบญจพล เวทย์วิวัฒน์

Benjapon Wethyavivorn

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Kasetsart University, Thailand

ธนภูมิ อัดตฤธิ์

Thanaphum Attarit

สำนักสถาปัตยกรรม กรมศิลปากร

Office of Architecture, Fine Arts Department, Thailand

E-mail: siradech.s@ku.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอแนวทางการพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างเพื่อใช้ในการประเมินความปลอดภัยทางด้านวิศวกรรมโครงสร้างสำหรับการบูรณะโบราณสถานและนำเสนอกระบวนการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างเจดีย์วัดชินอรามวรวิหาร เป็นงานวิจัยเชิงประยุกต์ สืบเนื่องจากการที่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างสามารถพัฒนาได้หลายระดับความละเอียดขึ้นกับสมมติฐานการพัฒนาแบบจำลอง และ โปรแกรมที่ใช้ แบบจำลองซึ่งมีรายละเอียดมากเกินไปอาจสร้างภาระที่เกินจำเป็นแก่ผู้พัฒนาแบบจำลองและกระบวนการวิเคราะห์โครงสร้าง ระดับรายละเอียดที่น้อยเกินไปอาจทำให้ผลลัพธ์จากที่ได้คลาดเคลื่อนจากโครงสร้างจริง โดยในงานวิจัยนี้มีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างซึ่งได้จากแบบจำลองที่มีความละเอียดต่างกันเพื่อเป็นแนวทางพิจารณาในการพัฒนาและวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างกระบวนการวิจัยดำเนินการโดยสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีระดับความละเอียดแตกต่างกัน 3 ระดับได้แก่ แบบจำลองเป้าหมายการตรวจสอบซึ่งมีรายละเอียดสูง (HDM) แบบจำลองแบบง่าย (SDM) สร้างจากกรอบปริมาตร (Boundary Volume) ของแบบจำลองรายละเอียดสูง และ แบบจำลองรายละเอียดต่ำ (LDM) ซึ่งลดรายละเอียดเรขาคณิตเป็น

* Received 19 November 2021; Revised 17 December 2021; Accepted 22 December 2021



ชิ้นส่วนท่อนเหล็พื้นที่หน้าตัด ความยาว และ มวล จากนั้นจึงวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นโดยการศึกษาหน่วยแรงต่งฉากในแบบจำลองทั้งหมดและทำการสร้างแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่ความสูงต่าง ๆ ผลการวิจัย พบว่า การสร้างแบบจำลองซึ่งมีระดับความละเอียดต่างกันสามารถสร้างกรอบอ้างอิงของผลเฉลยของการวิเคราะห์โครงสร้างได้ โดยแบบจำลอง LDM ให้ค่าขอบเขตล่างร้อยละ -6 และ แบบจำลอง SDM ให้ค่าขอบเขตบนที่ร้อยละ 17 โดยยังต้องมีการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสร้างกรอบปริมาตรอย่างเป็นระบบในลำดับต่อไป

คำสำคัญ: การตรวจสอบ, ไฟไนต์เอลิเมนต์, แบบจำลองโครงสร้าง, โครงสร้างโบราณสถาน

Abstract

The objectives of this research article were to propose the guideline to develop the structural engineering assessment model for the historical monument renovation. In addition, the verification process of the finite element model of Wat Chinorasaram Worawihan Pagoda was applied to this research. There are various levels of detail for developing the finite element model of structure, which was depending on the assumptions and limitations of the computer software. The model with highly details may cause unnecessary effort to the modeler and structural analyzing processes. In contrast, the model with low level of details may lead to inaccurate results. This research showed the comparison of analyzed results from different levels of model's precision as recommended in the guideline for the development and analysis of structural models. Investigation processes were performed by comparing the results obtained from 3 structural models with difference level of details. The based model with the highest level of details (HDM), the Simplified Detail model (SDM) created from boundary volume of the HDM, and the Low detail model created from rod-elements which compact all geometrical details into cross-sectional area and mass (LDM). After perform stress analysis of all three models, the relations between stress and elevations of the structure were constructed. This study found that using results from a multi-level of details can suggest the reference boundary for investigating the validity of the based model. LDM was provided the lower bound stress at -6% and SDM was provided upper bound stress at 17%. The systematic processes of creating boundary volume need more future investigation.

Keywords: Verification, Finite Element, Structural Model, Historical Structure



บทนำ

การบูรณะศาสนสถานเป็นหน้าที่ปฏิบัติหนึ่งของชาวพุทธ โดยการบูรณะแบ่งได้หลายระดับ ตั้งแต่การซ่อมแซมขนาดเล็ก ไปจนถึงขนาดใหญ่ โดยกรมศิลปากรมีคำจำกัดความดังต่อไปนี้ การสงวนรักษาหมายถึงการดูแลให้อยู่ในสภาพเดิม เท่าที่เป็นอยู่และไม่ให้เสื่อมสลายต่อไป การปฏิสังขรณ์ หมายถึงการทำให้กลับคืนสภาพอย่างที่เคยเป็นมา และการบูรณะ หมายถึง การซ่อมแซมโบราณสถานเพื่อฟื้นฟูรูปแบบหรือลักษณะเดิมของโบราณสถานนั้น โดยคำนึงถึงวัสดุ เทคนิค ฝีมือช่าง และสถานที่ดั้งเดิม รวมทั้งหลักฐานทางโบราณคดีและหลักฐานอื่น ๆ ในกรณีที่จำเป็นต้องเสริมส่วนที่ขาดหายไป ต้องทำให้กลมกลืนกับของเดิม ในขณะเดียวกันต้องคำนึงถึงความแตกต่างจากวัสดุเดิมด้วย (คณะกรรมการดำเนินงานจัดทำศุภพทานุกรมด้านโบราณคดีและพิพิธภัณฑ, 2550) พุทธศาสนสถานแปลโดยตรงได้ความว่า สถานที่ หรือสิ่งก่อสร้าง ซึ่งสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการกิจการ หรือเกี่ยวข้องกับพระพุทธศาสนา ได้แก่ สำนักสงฆ์ วัดวาอาราม โบสถ์ วิหาร เจดีย์ และสถูป เป็นต้น เป็นสถานที่ซึ่งใช้ประกอบพิธีทางศาสนา เป็นที่พำนักของพระภิกษุ และเป็นอนุสรณ์ให้ระลึกถึงคุณพระรัตนตรัย ซึ่งพุทธศาสนิกชนนิยมไปกราบไหว้บูชา และร่วมกิจกรรมต่าง ๆ ในปี 2561 จำนวนพุทธศาสนสถาน ในประเทศไทยที่มากขึ้นทะเบียนกับกรมศิลปากร มีจำนวนทั้งสิ้น 39,481 แห่ง (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2563) ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาทางวิชาการซึ่งนำเสนอแนวคิดในการอนุรักษ์ศาสนสถานได้อย่างถูกต้องและเป็นระบบ ทั้งในมุมมองด้านสถาปัตยกรรมศาสตร์ และ วิศวกรรมศาสตร์ เพื่อให้การอนุรักษ์เป็นไปอย่างสมบูรณ์ทั้งในแง่ความถูกต้องทางประวัติศาสตร์ และ ทำให้เกิดความแข็งแรงปลอดภัย ตามหลักทางวิศวกรรมเพื่อชดเชยกับการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นและอาจเกิดขึ้นในอนาคต (นวลลักษณ์ วัสน์ตชาติ, 2561) อย่างไรก็ตามจากสภาพการณ์ในปัจจุบัน การเปลี่ยนแปลงสภาพทางภูมิอากาศส่งผลต่อปริมาณน้ำฝน และระดับน้ำทะเลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดสภาพน้ำท่วมในพื้นที่ต่าง ๆ ในช่วงปี พ.ศ. 2485 ถึง พ.ศ. 2550 ระดับน้ำทะเลในอ่าวไทยมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในช่วง 1.2 - 2.2 มิลลิเมตรต่อปี (Trisirisatayawong, I. et al., 2011) และได้มีการคาดการณ์ว่าระดับน้ำทะเลจะสูงขึ้นถึง 60 เซนติเมตร ในปี พ.ศ. 2643 (Marks, D., 2011) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ รวมถึงพุทธสถานที่มีอยู่ พุทธสถานที่มีสถานะเป็นโบราณสถานโดยส่วนใหญ่ถูกสร้างขึ้นเป็นโครงสร้างอิฐก่อ (Masonry Structure) เมื่อเทียบกับวัสดุโครงสร้างอื่น ๆ แล้วถือว่ามีความเปราะบางและได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้ง่าย เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในบางกรณีการบูรณะมีความจำเป็นต้องเคลื่อนย้ายหรือปรับยกระดับให้สูงขึ้นเพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น การเคลื่อนย้ายดังกล่าวอาจส่งผลกระทบให้เกิดความเสียหาย ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากกระบวนการบูรณะอย่างรอบคอบ (สมศักดิ์ ธรรมเวชวิธิ, 2559)



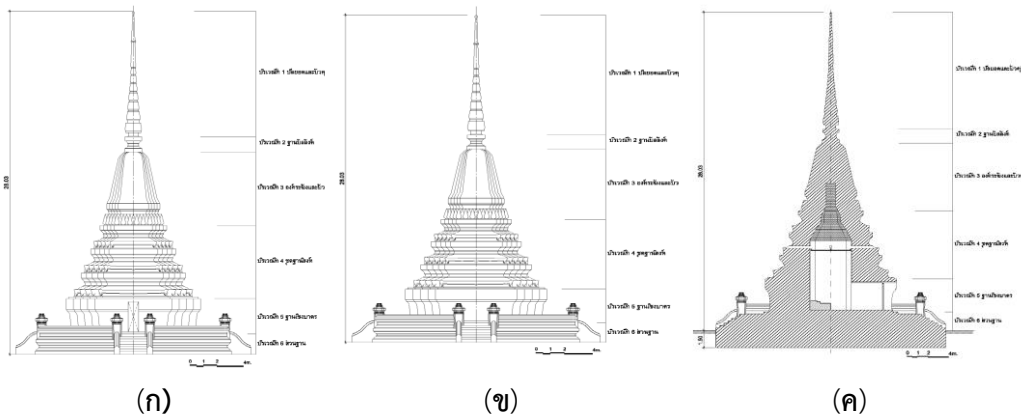
ในแง่มุมมองทางวิศวกรรมโครงสร้าง การศึกษาผลที่เกิดจากแรงที่กระทำต่อโครงสร้างสามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Modeling) ซึ่งเป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับระเบียบวิธีทางตัวเลข (Numerical Method) แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ในวงกว้างไม่จำกัดแต่เพียงโครงสร้างทางวิศวกรรมสมัยใหม่เท่านั้น ที่ผ่านมามีการใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างโบราณสถานซึ่งเป็นโครงสร้างอิฐก่อโบราณ (Wethyavivorn, B. et al., 2016) ทั้งในรูปแบบการวิเคราะห์แบบจำลองแยกส่วนที่พิจารณาว่าอิฐและวัสดุประสานไม่ได้เป็นวัสดุเนื้อเดียว (Serpieri, R. et al., 2017) และ แบบจำลองที่อนุमानว่าอิฐก่อและวัสดุประสานเป็นวัสดุเนื้อเดียว (Homogeneous Material) (Ishida, Y. et al., 2021) ในการศึกษาโบราณสถานในประเทศไทย ได้มีการใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองพฤติกรรมการตอบสนองของอิฐก่อที่มีต่อแรงกระทำ (Wonganan, N. et al., 2020) พฤติกรรมการสั่นสะเทือน (ภคพงศ์ ภัทราคม และนคร ภูวโรตม, 2560) การศึกษาการปฏิสัมพันธ์ของชั้นดิน (รณนา พจนา, 2550) ศึกษาการผลที่เกิดจากคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดกับพระธาตุคุดยสุเทพ (Hansapinyo, C., 2014) การศึกษาการบูรณะเจดีย์วัดชีโนรสารามวรวิหารโดยการยกระดับ (ธนภูมิ อัตตฤทธิ, 2563) การใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่ยอมรับถึงความสามารถในการจำลองสถานการณ์ที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามเนื่องจากโครงสร้างทางโบราณสถานโดยเฉพาะพุทธสถานเป็นโครงสร้างที่มีความวิจิตรซับซ้อนทางเรขาคณิตสูง การสร้างแบบจำลองอาจเกิดความผิดพลาดได้หลายปัจจัยเช่นการเกิดการแยกส่วนของโครงสร้าง (Structural Isolation) การกำหนดสภาพบังคับของโครงสร้าง (Structural Constraint) ที่มีการซ่อนตัวและไม่ตรงตำแหน่ง การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองอาจทำได้ยาก (Yazgan, I. O. & Unay, A. I., 2020) การสร้างแบบจำลองที่มีข้อบกพร่องเกินกว่าขอบเขตที่ยอมรับได้ทำให้ผลที่ได้ อาจเกิดความผิดพลาดและมีการตีความที่ผิด ส่งผลเสียต่อการนำข้อมูลไปใช้ในการวางแผนจัดการ ดังนั้นกระบวนการสร้างกรอบขอบเขตของผลเฉลยเพื่อใช้ในการตรวจสอบความสมเหตุสมผลของคำตอบที่การวิเคราะห์จึงมีความจำเป็นเป็นอย่างยิ่ง (Roca, P. et al., 2010)

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ใช้กรณีศึกษาของเจดีย์วัดชีโนรสารามวรวิหารจากการศึกษาในปี 2563 (ธนภูมิ อัตตฤทธิ, 2563) เป็นแบบจำลองอ้างอิง วัดชีโนรสารามวรวิหารตั้งอยู่ที่ถนนอิสราภาพ แขวงบ้านช่างหล่อ เขตบางกอกน้อย กรุงเทพมหานคร เป็นพระอารามหลวงชั้นตรี ชนิด “วรวิหาร” สมเด็จพระมหาสมณเจ้า กรมพระปรมานุชิตชิโนรส โปรดให้ไวยาวัจกรในพระองค์จัดซื้อที่ดินสวนชาวบ้านเพื่อสร้างเป็นวัดในสมัยรัชกาลที่ 3 ในปี พ.ศ. 2379 เจดีย์มีลักษณะทรงระฆังย่อมุมไม่มีสืบสร้างขึ้นในสมัยรัชกาลที่ 4 ทั้งสององค์มีรูปแบบและขนาดเดียวกัน ก่อด้วยอิฐฉาบปูน ฐานล่างสุด อยู่ใต้ดินที่ถมพื้นที่ให้สูงกว่าเดิมประมาณ 1 เมตร ฐานมีผนังกันเป็นลานประทักษิณ แผนผังรูปแปดเหลี่ยมของฐาน มีช่องทางขึ้นหลักสี่ด้าน



ภาพที่ 1 แบบสถาปัตยกรรมของเจดีย์วัดชินรสาธรรามวรวิหาร
(ธนภูมิ อັตตฤทธิ, 2563)

ซึ่งมิติทางสถาปัตยกรรมของเจดีย์วัดชินโรสารามวรวิหารซึ่งใช้อ้างอิงในงานวิจัยนี้
ในส่วนด้านหน้า ด้านข้าง และภาพตัดขวาง แสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 มิติทางสถาปัตยกรรมและภาพตัด (ก) ด้านหน้าของเจดีย์ (ข) ด้านข้างของเจดีย์ (ค) ภาพตัดขวางแสดงห้องโถงภายใน (ธนภูมิ อุตตฤทธิ, 2563)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอแนวทางการพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างเจดีย์เพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์ ร่วมกับการวิเคราะห์สมมูลสถิตยจากน้ำหนักบรรทุกทุกตายตัวของโครงสร้าง โดยใช้แบบจำลองโครงสร้างที่มีระดับความละเอียด 3 ระดับ เพื่อสร้างขอบเขตผลลัพธ์นำไปใช้ในการทวนสอบความถูกต้องแบบจำลองโครงสร้างที่ต้องการประยุกต์ใช้งานในวัตถุประสงค์เฉพาะอื่น ๆ ในลำดับต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อเสนอแนวทางการพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างเพื่อใช้ในการประเมินความปลอดภัยทางด้านวิศวกรรมโครงสร้างสำหรับการบูรณะโบราณสถาน
2. เพื่อนำเสนอกระบวนการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างเจดีย์วัดชินวรสารามวรวิหาร

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยเรื่องการตรวจสอบแบบจำลองโครงสร้างเจดีย์วัดชินวรสารามวรวิหารเป็นการวิจัยรูปแบบประยุกต์ มีรายละเอียดวิธีการวิจัยดังนี้

1. แนวทางการพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างเจดีย์เพื่อใช้ในการประเมินความปลอดภัยทางด้านวิศวกรรมโครงสร้างสำหรับการบูรณะโบราณสถาน โดยในการวิจัยนี้ใช้โครงสร้างเจดีย์วัดชินวรสารามวรวิหารเป็นกรณีศึกษาโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.1 ศึกษาแผนผังทางสถาปัตยกรรมของเจดีย์วัดชินวรสารามวรวิหาร ตามภาพที่ 2



1.2 ศึกษาวัสดุและสร้างแบบจำลองวัสดุ ใช้อ้างอิงผลการทดสอบ งานวิจัยของกรมศิลปากร และ วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยใช้ค่ากลสมบัติของวัสดุตั้งตารางที่ 1 และสมบัติทางกายภาพตามตารางที่ 2 โดยในการศึกษานี้ใช้แนวคิดการสร้างแบบจำลองวัสดุแบบเนื้อเดียว (Homogeneous Material Mode)

1.3 พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ความละเอียดสูงเพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์

1.4 การประเมินความปลอดภัยในการบูรณะ การเคลื่อนย้าย พิจารณาถึงสถานะขีดจำกัดของวัสดุร่วมกับสัดส่วนความปลอดภัยเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจ

ตารางที่ 1 กลสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

กลสมบัติ	ค่ากลสมบัติ (MPa)
กำลังอัดประลัยของอิฐก่อ	4.315
กำลังดึงประลัยของอิฐก่อ	0.245
โมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐก่อ	3,138.240

(ธนภูมิ อัตตฤทธิ, 2563); (สุดชาย พานสุวรรณ, 2543)

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

สมบัติทางกายภาพ	ค่าสมบัติทางกายภาพ
สัดส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)	0.220
ความหนาแน่น (Density)	1,800 kg/m ³

(สุดชาย พานสุวรรณ, 2543); (Wethyavivorn, B. et al., 2016)

2. กระบวนการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างเจดีย์วัดชีโนรสารามวรวิหาร เริ่มจากการพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างโดยเพื่อการเปรียบเทียบกัน 3 ระดับดังต่อไปนี้

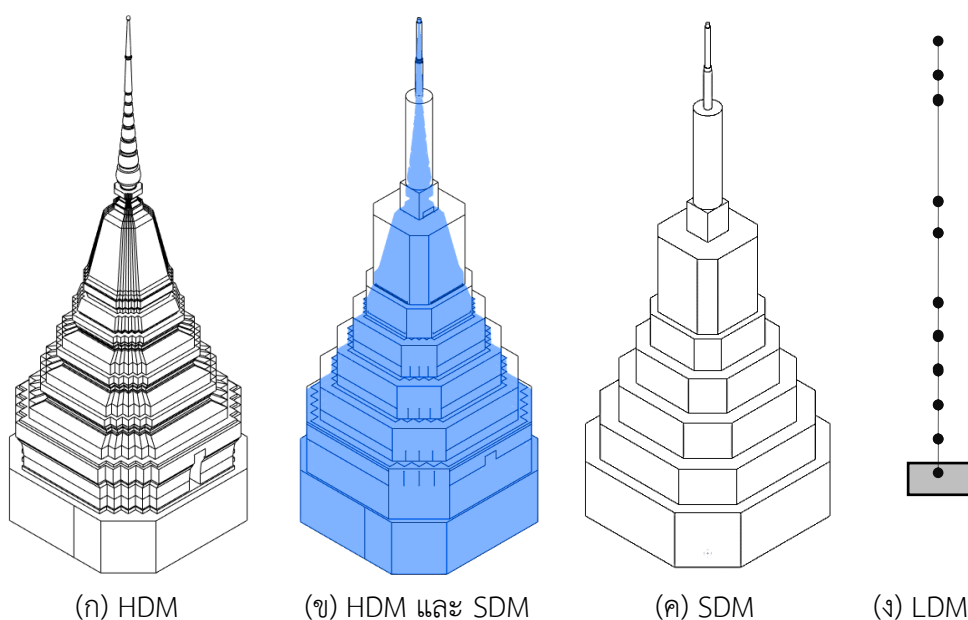
2.1 พัฒนาแบบจำลองโครงสร้างเจดีย์แบบความละเอียดสูง (Highly Detail Model, HDM) ใช้สมบัติของวัสดุตามตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2 โดยใช้งานโปรแกรม Autodesk Fusion 360 (ธนภูมิ อัตตฤทธิ, 2563) โดยแบบจำลองที่ใช้เป็นโครงสร้างเจดีย์ที่ไม่มีลานประทักษิณ ซึ่งเป็นสภาพที่ตรงกับเงื่อนไขในการบูรณะดังแสดงในภาพที่ 3 (ก)

2.2 พัฒนาแบบจำลองโครงสร้างเจดีย์แบบง่าย (Simplified Detail Model, SDM) ซึ่งสร้างโดยใช้แบบจำลองลักษณะกรอบปริมาตร (Boundary Volume) เรียงซ้อนกันดังแสดงในภาพที่ 3 (ข) โดยในแต่ละหน้าตัดที่ขึ้นรูป (Extrude) จะมีปริมาณวัสดุครอบคลุมขอบเขตภายนอกแบบจำลอง HDM แต่เป็นลักษณะลดทอนรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 3



(ค) โดยใช้สมบัติของวัสดุตามตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2 โดยใช้งานโปรแกรม Autodesk Fusion 360 เช่นเดียวกับแบบจำลอง HDM

2.3 แบบจำลองแบบรายละเอียดต่ำ (Low Detail Model, LDM) ใช้ชิ้นส่วนแบบท่อน (Rod Element) โดยการนำเอามวลแต่ละช่วงของการเปลี่ยนองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมช่วงต่าง ๆ ของแบบจำลอง HDM นำมาคิดเป็นน้ำหนักและหารด้วยพื้นที่หน้าตัดด้านล่างของแต่ละช่วงของแบบจำลอง HDM ที่สอดคล้องกัน ดังแสดงในภาพที่ 3 (ง)



ภาพที่ 3 แบบจำลองโครงสร้างในระดับความละเอียดต่าง ๆ

3. ทำการวิเคราะห์แบบจำลอง HDM และ SDM ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแบบจำลอง LDM ใช้การคำนวณน้ำหนักสะสมแล้วจึงทำการวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงอัดตั้งฉาก

4. ศึกษาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นโดยทำดูจากหน่วยอัดสูงสุดในแต่ละภาพตัดขวางตามแนวแกนตั้งขององค์เจดีย์

5. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและที่ช่วงความสูงจุดเปลี่ยนขององค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมของโครงสร้าง ดังต่อไปนี้ เม็ดน้ำค้าง ปลียอด วงแหวน (ลูกแก้ว) ปลี บัวคลุมเถา บัลลังก์ ทรงระฆัง บัวคลุม ฐานสิงห์ (บน) ฐานสิงห์ (กลาง) ฐานสิงห์ (ล่าง) เชิงบาตร และ ฐานเจดีย์ ตามลำดับ

6. วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสรุปออกมาเป็นแนวทางเพื่อการศึกษาความถูกต้องของแบบจำลอง



ผลการวิจัย

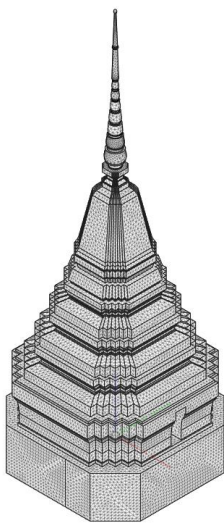
ผลการวิจัยพบว่า

1. แนวทางการพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างเจดีย์เพื่อใช้ในการประเมินความปลอดภัยทางด้านวิศวกรรมโครงสร้าง โดยมีโครงสร้างเจดีย์วัดชีโนรสารามวรวิหารเป็นกรณีศึกษา ผลการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มีรายละเอียดตามตารางที่ 3 และมีลักษณะเฉพาะของไฟไนต์เอลิเมนต์ตามตารางที่ 4

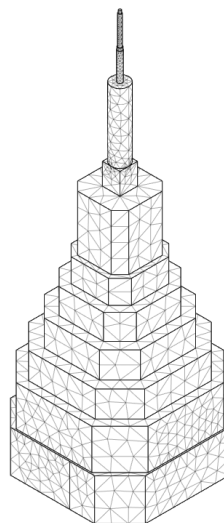
ตารางที่ 3 แบบจำลองโครงสร้างที่ระดับความละเอียดต่างกัน

ระดับความละเอียด	แนวคิดการสร้างแบบจำลอง	ชนิดของชิ้นส่วนไฟไนต์เอลิเมนต์
HDM	เหมือนโครงสร้างจริง	Tetrahedral Element
SDM	แบบใช้กรอบปริมาตร	Tetrahedral Element
LDM	แบบแท่ง	Rod Element

สภาพบังคับที่ฐานรองรับ (Support condition): ยึดแน่น (Fixed-End condition)
กรณีแรงกระทำ (Load case): แรงกระทำจากแรงโน้มถ่วง และ น้ำหนักบรรทุกทุกตายตัว (Self-weight)



(ก) HDM



(ข) SDM



(ค) LDM

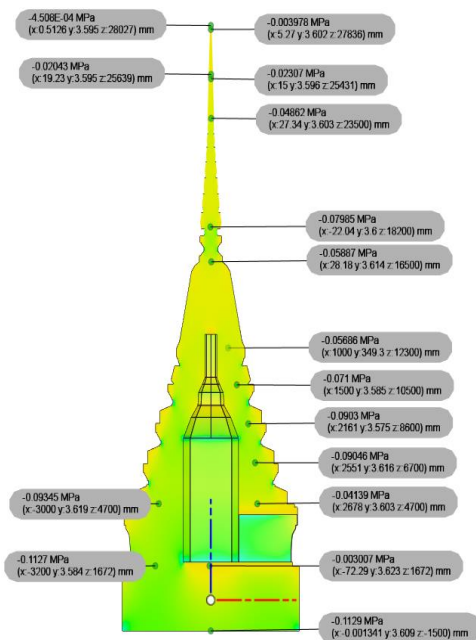
ภาพที่ 4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองเจดีย์ที่ระดับความละเอียดต่าง ๆ กัน



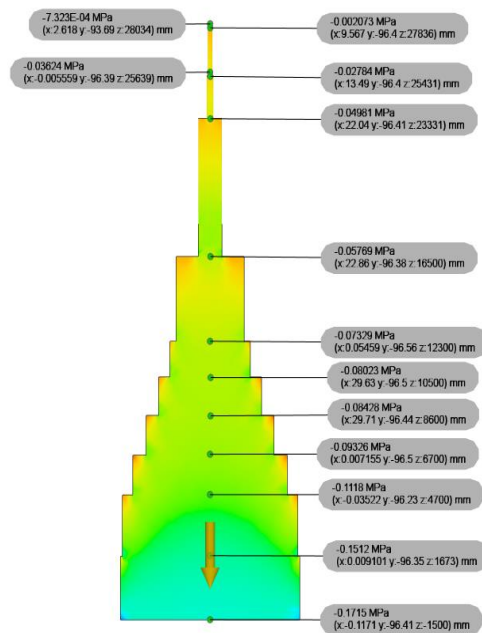
ตารางที่ 4 ลักษณะเฉพาะของโครงตาข่ายที่ใช้ในแบบจำลองที่ทำการศึกษา

ระดับความละเอียด	ความยาวควบคุมโครงตาข่าย (เมตร)	จำนวนชิ้นส่วน (ชิ้น)	หมายเหตุ
HDM	0.20	564,291	- ภาพที่ 4 (ก)
SDM	1.00	54,590	- ภาพที่ 4 (ข)
LDM	-	12	ไม่แบ่งชิ้นส่วนย่อย ภาพที่ 4 (ค)

โดยผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลอง HDM แสดงในภาพที่ 5 (ก) และ ผลของการวิเคราะห์แบบจำลอง LDM แสดงในตารางที่ 5 (ข) ในกรณีของโครงสร้าง ซึ่งการสร้างแบบจำลอง LDM นั้น การวิเคราะห์ทำโดยการใช้มวลอ้างอิงโดยการแบ่งโครงสร้าง ความละเอียดสูงเป็นส่วนๆ ตามจุดเปลี่ยนทางองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรม จากนั้นจึงหาค่าหน่วยแรงอัดตั้งฉากกับแนวแกนความสูงของเจดีย์ซึ่งเทียบได้กับหน่วยแรงตามแนวแกนตั้งของโครงสร้าง โดยใช้ให้น้ำหนักสะสมหารด้วยพื้นที่หน้าตัดด้านล่างแต่ละส่วนประกอบทางสถาปัตยกรรมเพื่อคำนวณหน่วยแรงที่เกิดขึ้น ที่จุดเปลี่ยนองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมต่าง ๆ โดยผลการวิเคราะห์หน่วยแรงแสดงดังตารางที่ 5



(ก) HDM มวล 1,376 ชิ้น



(ข) SDM มวล 1,751 ชิ้น

ภาพที่ 5 หน่วยแรงอัดตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง HDM และ SDM



ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงจากแบบจำลอง LDM

องค์ประกอบ	พื้นที่หน้าตัด	มวล	น้ำหนัก	น้ำหนักสะสม	หน่วยแรง
เม็दन้าค้ำง	0.008	8.2764	81	81	0.003
ปลียอด	0.050	98.658	968	1,049	0.021
วงแหวน (ลูกแก้ว)	0.050	24.948	245	1,294	0.026
ปลี	0.063	289.8	2,843	4,137	0.066
บัวคลุมเถา	0.857	4249.8	41,691	45,827	0.053
บัลลังก์	1.506	2,718	26,664	72,491	0.048
ทรงระฆัง	12.734	55,440	543,866	616,357	0.048
บัวคลุม	15.477	46,098	452,221	1,068,579	0.069
ฐานสิงห์ (บน)	23.918	70,434	690,958	1,759,536	0.074
ฐานสิงห์ (กลาง)	36.921	101,916	999,796	2,759,332	0.075
ฐานสิงห์ (ล่าง)	72.146	185,400	1,818,774	4,578,106	0.063
เชิงบาตร	75.528	364,140	3,572,213	8,150,320	0.108
ฐานเจดีย์	95.532	545,400	5,350,374	13,500,694	0.141

2. กระบวนการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างเจดีย์วัดชีโนรสารามวรวิหาร เป็นการดำเนินการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงโดยใช้จุดเปลี่ยนองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมระหว่างแบบจำลองทั้ง 3 ระดับความละเอียด โดยมีผลดังตารางที่ 6

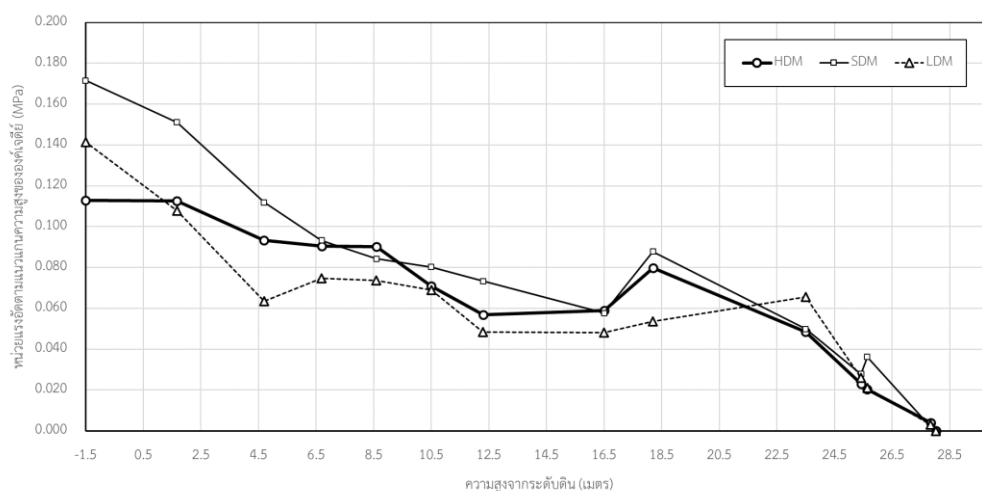
ตารางที่ 6 หน่วยแรงอัดตามแกนหลักของเจดีย์

องค์ประกอบอ้างอิง	ความสูงจากระดับพื้น (เมตร)	หน่วยแรงอัดตามแกนหลักของเจดีย์ (MPa)		
		HDM	SDM	LDM
ยอดเจดีย์	28.027	0.000	0.000	0.000
เม็दन้าค้ำง	27.836	0.004	0.002	0.003
ปลียอด	25.639	0.020	0.036	0.021
วงแหวน (ลูกแก้ว)	25.421	0.023	0.028	0.026
ปลี	23.500	0.049	0.050	0.066
บัวคลุมเถา	18.200	0.080	0.088	0.053
บัลลังก์	16.500	0.059	0.058	0.048

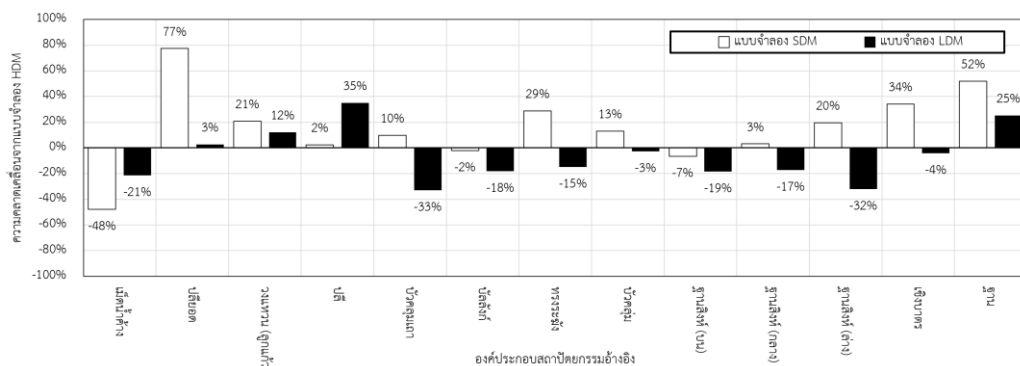


องค์ประกอบอ้างอิง	ความสูงจากระดับพื้น (เมตร)	หน่วยแรงอัดตามแกนหลักของเจดีย์ (MPa)		
		HDM	SDM	LDM
ทรงระฆัง	12.300	0.057	0.073	0.048
บัวกลุ่ม	10.500	0.071	0.080	0.069
ฐานสิงห์ (บน)	8.600	0.090	0.084	0.074
ฐานสิงห์ (กลาง)	6.700	0.090	0.093	0.075
ฐานสิงห์ (ล่าง)	4.700	0.093	0.112	0.063
เชิงบาตร	1.672	0.113	0.151	0.108
ฐาน	-1.500	0.113	0.172	0.141

โดยตารางที่ 6 ถูกนำมาแสดงผลในรูปแบบภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงตั้งฉากในแนวความยาวตามแกนความสูงของเจดีย์ตามภาพที่ 6 และแสดงร้อยละของความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองความละเอียดสูงตามภาพที่ 7 ซึ่งเมื่อพิจารณาโดยรวมในทุกองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลอง LDM มีแนวโน้มที่จะให้ค่าขอบเขตล่างและแบบจำลอง SDM มีแนวโน้มจะให้ค่าเป็นขอบเขตบน ซึ่งในกรณีศึกษานี้เป็น ร้อยละ -6 และ ร้อยละ +17 ตามลำดับ



ภาพที่ 6 เปรียบเทียบการกระจายตัวของหน่วยแรงในแบบจำลองที่มีระดับความละเอียดแตกต่างกัน



ภาพที่ 7 ความคลาดเคลื่อนของหน่วยแรงระหว่างแบบจำลอง SDM และแบบจำลองแบบ LDM

จากค่าขอบเขตผลลัพธ์ที่ได้ ทำให้สรุปได้ว่าแบบจำลอง HDM ซึ่งจะถูกนำไปใช้ให้ผลการวิเคราะห์อยู่ในช่วงค่าขอบเขต จึงเป็นแบบจำลองมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

อภิปรายผล

จากผลการวิจัยสามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

การพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างเจดีย์วัดชินวรสารามวรวิหารเพื่อใช้ในการประเมินความปลอดภัยทางด้านวิศวกรรมโครงสร้างสามารถใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองโครงสร้างที่มีความซับซ้อนทั้งด้านรูปแบบทางเรขาคณิต และสามารถสร้างแบบจำลองของวัสดุเนื้อเดียวซึ่งมีพฤติกรรมเชิงเส้นได้ดังกระบวนการในการพัฒนาแบบจำลองเจดีย์ที่ใช้ในการศึกษานี้ ซึ่งมีสมมุติฐานเดียวกับการพัฒนาแบบจำลองเจดีย์ทรงระฆังคว่ำที่วัดใหญ่ชัยมงคล (Wethyavivorn, B. et al., 2016) และ วัดพระธาตุดอยสุเทพ (Hansapinyo, C. & Poovarodom, N., 2014) กล่าวคือ เป็นวัสดุเนื้อเดียวชนิดที่มีพฤติกรรมเชิงเส้น และรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกตัวเพียงอย่างเดียว ปัจจัยที่อาจมีผลต่อการสร้างแบบจำลองเจดีย์คือจุดรองรับที่มีขอบเขตไม่เป็นที่แน่ชัดรวมถึงปฏิสัมพันธ์ของชั้นดินที่อาจส่งผลต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง หน่วยแรงอัดตามแนวแกนที่ฐานรองรับในการศึกษานี้คือ 0.113 MPa โดยในการศึกษาเจดีย์ทรงระฆังคว่ำของวัดอุโมงค์จังหวัดเชียงใหม่ ที่มีความสูง 25.75 เมตร ในปี พ.ศ. 2553 (กนกวรรณ ยานะถนอม, 2553) ซึ่งมีจำนวนชั้นส่วน 57,163 ชั้นส่วนใกล้เคียงกับแบบจำลอง LDM ในการศึกษานี้ พบว่าแรงอัดตั้งฉากที่ฐานรากมีค่าในช่วง 0.097 - 0.148 MPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับช่วงของหน่วยแรงที่ได้จากการศึกษานี้ คือ 0.113 - 0.141 MPa

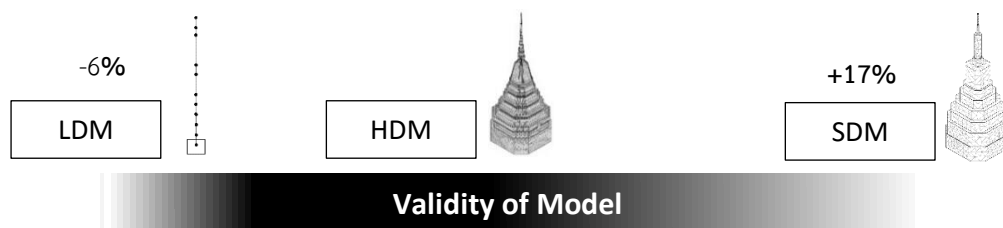
แนวคิดในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการวิเคราะห์สมดุลของแรงแนวดิ่งจากหน่วยน้ำหนักจริงของโครงสร้าง การเปลี่ยนชนิดและมิติของชั้นส่วน เป็นแนวทางหนึ่งซึ่งสามารถใช้ความถูกต้องของแบบจำลองได้ (Bolognese, J., 2009) ซึ่งจากภาพที่ 6



พบว่า แนวโน้มของผลการวิเคราะห์เป็นไปในทิศทางเดียวกันในแบบจำลองทั้ง 3 ระดับทำให้แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือ จากผลการวิเคราะห์แบบจำลอง LDM ให้ค่าหน่วยแรงอัดตั้งฉากในทิศทางตามแกนตั้งของเจดีย์มีแนวโน้มเป็นค่าซึ่งน้อยกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลอง HDM โดยมีค่าตั้งแต่ร้อยละ -33 ถึงร้อยละ 25 ในขณะที่การสร้างแบบจำลอง SDM ซึ่งใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์มีความแตกต่างของค่าหน่วยแรงที่ค่อนข้างมากกว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง HDM ตั้งแต่ร้อยละ -48 ถึงร้อยละ 77 ทั้งนี้เนื่องจากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในสามมิติ อาจมีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงทำให้เกิดความเข้มข้นของหน่วยแรงเฉพาะที่ (Stress Concentration) ซึ่งอาจเป็นแหล่งที่มาของความคลาดเคลื่อนของหน่วยแรง ซึ่งการที่แบบจำลอง LDM มีหน่วยแรงแตกต่างจากแบบจำลอง HDM ที่เปลี่ยนมากที่สุดเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแบบจำลองชัดเจน นอกจากนี้แบบจำลอง LDM ได้ลดทอนรายละเอียดในโคงที่อยู่ภายในเจดีย์ออกไป ซึ่งทำให้หน่วยแรงตั้งแต่วางสิ่งจนถึงเชิงบาตรมีค่ามากกว่าหน่วยแรงในแบบจำลอง HDM อย่างไรก็ตามการตรวจสอบแบบจำลองโดยการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ (Dynamic Analysis) รวมถึงการตรวจวัดโครงสร้างจริงในพื้นที่ปฏิบัติงานอาจช่วยเพิ่มระดับความถูกต้องของแบบจำลองโครงสร้างให้ตรงกับสภาพความเป็นจริงมากขึ้น (ณรงค์ฤทธิ์ จันทน์วัฒนวงษ์ และกริสน์ ชัยมูล, 2563)

องค์ความรู้ใหม่

ในบทความวิจัยนี้ได้นำเสนอขั้นตอนและแนวทางในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโครงสร้าง ซึ่งสามารถทำได้ โดยหลักการวิเคราะห์สมดุลของแรงในแนวตั้ง โดยผลรวมของน้ำหนักโครงสร้างจากแบบจำลอง LDM ประกอบกับแบบจำลอง SDM เพื่อสร้างกรอบขอบเขตของค่าผลลัพธ์ที่สมเหตุผลในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองใช้งาน HDM ตามภาพที่ 8 โดยการนำเสนอกรณีศึกษาในบทความวิจัยนี้เป็นตัวอย่างแนวทางการตรวจสอบแบบจำลองเชิงปฏิบัติ ซึ่งผู้พัฒนาแบบจำลองสามารถตรวจสอบได้ก่อนการนำผลการตรวจวัดจากโครงสร้างจริงมาประกอบการปรับความแม่นยำของแบบจำลอง นอกจากนี้ยังอาจประยุกต์แนวทางการตรวจสอบความถูกต้องที่นำเสนอในบทความนี้ไปใช้กับแบบจำลองโครงสร้างอื่นได้เช่นกัน



ภาพที่ 8 กรอบขอบเขตความถูกต้องของแบบจำลอง



สรุป/ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างเจดีย์เพื่อใช้ในการประเมินความปลอดภัยทางด้านวิศวกรรมโครงสร้าง และ ตรวจสอบความถูกต้องการสร้างแบบจำลอง สรุปได้ว่าควรมีการพัฒนาแบบจำลองที่มีความละเอียด 3 ระดับร่วมกันคือแบบจำลองความละเอียดต่ำสุด LDM ซึ่งใช้พื้นที่หน้าตัด และ มวล ซึ่งได้จากแบบจำลองที่มีความละเอียดสูง HDM และ แบบจำลองความละเอียดปานกลาง SDM ซึ่งได้จากการปรับรูปแบบโครงสร้างให้ลดทอนรายละเอียดของโครงสร้างลงในลักษณะปริซึมกรอบปริมาตรแบบจำลองทั้ง 3 ระดับจะนำไปใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง HDM โดยแบบจำลอง LDM เป็นการกำหนดขอบเขตล่างของผลการวิเคราะห์และแบบจำลอง SDM เป็นการกำหนดขอบเขตบนของผลการวิเคราะห์ ในกรณีศึกษาที่ใช้ในการวิจัยนี้แบบจำลอง LDM ให้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลอง HDM ร้อยละ 6 และแบบจำลอง SDM มีค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนมากกว่าแบบจำลอง HDM ร้อยละ 17 อย่างไรก็ตามในการวิจัยนี้ไม่ได้กำหนดขั้นตอนในการสร้างแบบจำลอง SDM จึงอาจมีการศึกษาถึงการเปรียบเทียบวิธีการสร้างกรอบปริมาตรอัตโนมัติที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกรณีอื่นในอนาคตได้

เอกสารอ้างอิง

- กนกวรรณ ยานะถนอม. (2553). พฤติกรรมเชิงสถิติศาสตร์และพลศาสตร์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวของเจดีย์ในเขตเมืองเชียงใหม่โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์. ใน วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- คณะกรรมการดำเนินงานจัดทำคัพทานุกรมด้านโบราณคดีและพิพิธภัณฑ. (2550). คัพทานุกรมโบราณคดี. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: สำนักโบราณคดี กรมศิลปากร.
- ณรงค์ฤทธิ์ จันทน์วัฒนวงษ์ และกริสน์ ชัยมูล. (2563). พฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของเจดีย์คอนกรีตเสริมเหล็ก. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, 31(1), 101-110.
- ธณภูมิ อัดตฤทธิ. (2563). การวิเคราะห์หน่วยแรงของโครงสร้างเจดีย์อิฐก่อเพื่อหาส่วนปลอดภัยกรณียกปรับระดับความสูง. ใน วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้าง. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นวลลักษณ์ วีสันตชาติ. (2561). ปูนในโบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาแหล่งมรดกโลก. วารสารหน้าจั่วว่าด้วยสถาปัตยกรรมการออกแบบและสภาพแวดล้อม, 33(2018), B43-B92.
- ภคพงศ์ ภัทราคม และนคร ภู่วโรดม. (2560). การตรวจวัดสมบัติเชิงพลศาสตร์ของพระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 25(4), 670-682.



- รณณา พงนา. (2550). ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้างโบราณสถานจังหวัดเชียงใหม่ ภายใต้สภาวะการกระทำของแรงแผ่นดินไหว. ใน ดุษฎีนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมศักดิ์ ธรรมเวชวิที. (2559). การบูรณะอาคารมีคุณค่าทางประวัติศาสตร์และศิลปวัฒนธรรม. วารสารวิชาการ การออกแบบสภาพแวดล้อม, 3(1), 3-19.
- สำนักงานสถิติแห่งชาติ. (2563). จำนวนวัดจำแนกตามนิกายเป็นรายภาคและจังหวัด พ.ศ. 2552-2561. เรียกใช้เมื่อ 15 ตุลาคม 2563 จาก <http://statbbi.nso.go.th/staticreport/page/sector/th/04.aspx>
- สุดชาย พานสุวรรณ. (2543). การวิเคราะห์โบราณสถานก่ออิฐในเชิงวิศวกรรม. ใน วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Bolognese, J. (2009). Finite Element Model Validity Checks. Retrieved July 31, 2021, from <https://femci.gsfc.nasa.gov/validitychecks>
- Hansapinyo, C. (2014). Seismic performances of brick masonry inverted bell-shaped Chedi. APCBEE Procedia, 9(2014), 217-221.
- Hansapinyo, C. & Poovarodom, N. (2014). Ambient Vibration Tests and Finite Element Analysis for Dynamic Properties of Brick Masonry Inverted Bell-shaped Chedi. APCBEE Procedia, 9(2014), 212-216.
- Ishida, Y. et al. (2021). Inhibitory Effect Of Ground Improvement On The Settlement Of The Leaning Pagoda. International Journal of GEOMATE, 20(79), 111-118.
- Marks, D. (2011). Climate change and Thailand: Impact and response. Contemporary Southeast Asia: A Journal of International and Strategic Affairs, 33(2), 229-258.
- Roca, P. et al. (2010). Structural analysis of masonry historical constructions. Classical and advanced approaches. Archives of computational methods in engineering, 17(3), 299-325.
- Serpiery, R. et al. (2017). A 3D microstructured cohesive-frictional interface model and its rational calibration for the analysis of masonry panels. International Journal of Solids and Structures, 122(2017), 110-127.
- Trisirisatayawong, I. et al. (2011). Sea level change in the Gulf of Thailand from GPS-corrected tide gauge data and multi-satellite altimetry. Global and Planetary Change, 76(3-4), 137-151.



- Wethyavivorn, B. et al. (2016). Model verification of Thai historic masonry monuments. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(1), 1-14.
- Wonganan, N. et al. (2020). Ancient Materials and Substitution Materials Used in Thai Historical Masonry Structure Preservation. *Journal of Renewable Materials*, 9(2), 179-204.
- Yazgan, I. O. & Unay, A. I. (2020). Planning a Relocation Method to Preserve Structural Integrity During the Holistic Relocation of Historical Buildings. *Journal of Architectural Engineering*, 26(4), 1-10.