

การตรวจวัดสมบัติเชิงพลศาสตร์ของพระเจดีย์ วัดใหญ่ชัยมงคล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

Dynamic Investigations of the Main Stupa of Wat Yai Chaimongkol, Ayutthaya

ภคพงศ์ ภัทราคม และนคร ภูวโรดม*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Bhakapong Bhadrakom and Nakhorn Poovarodom*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University Rangsit Centre,

Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

บทคัดย่อ

จังหวัดพระนครศรีอยุธยามีโบราณสถานที่ทรงคุณค่าต่อประเทศอยู่เป็นจำนวนมาก และได้รับการยกย่องเป็นมรดกโลกโดยองค์การ UNESCO ปัจจุบันโครงสร้างเหล่านี้ได้เกิดการเสื่อมสภาพไปตามกาลเวลาและผลกระทบต่าง ๆ จากสภาพแวดล้อม เช่น สภาพอากาศ การทรุดตัวของดิน หรืออุทกภัย และส่งผลเสียต่อความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้าง ดังนั้นจึงควรมีการดำเนินการศึกษาวิจัยสำหรับการวางแผนเพื่อการอนุรักษ์โครงสร้างเหล่านี้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติเชิงพลศาสตร์ของพระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งเป็นเจดีย์รูปทรงระฆังคว่ำ มีความสูงประมาณ 70 เมตร และสร้างขึ้นในราว พ.ศ. 2135 เจดีย์องค์นี้มีการเสื่อมสภาพตามกาลเวลาที่สามารถตรวจพบจากเนื้อของวัสดุและเกิดการเอียงตัวที่มองเห็นอย่างชัดเจน การศึกษานี้ดำเนินการตรวจวัดสมบัติเชิงพลศาสตร์ของพระเจดีย์จากการสั่นไหวในสภาพแวดล้อม เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นทางด้านข้างโดยใช้การแปลงสัญญาณฟูเรียร์ และหารูปร่างการสั่นไหวจากอัตราส่วนของขนาดฟูเรียร์ โดยผลการศึกษาที่ได้จะสามารถนำไปใช้ในการปรับแก้แบบจำลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเจดีย์และเป็นค่าอ้างอิงเพื่อการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติของพระเจดีย์ในอนาคต

คำสำคัญ : สมบัติเชิงพลศาสตร์; การทดสอบการสั่นไหวจากสภาพแวดล้อม; เจดีย์โบราณสถาน; อยุธยา

Abstract

Ayutthaya, Thailand, has many valuable historical remains and has been considered as a UNESCO World Heritage Site. The present archaeological structures have been suffered from several

causes of deterioration, such as weather, ground settlement, flood, and other environmental factors. These causes directly affect the stability of the ruins and therefore conservation plans should be conducted through essential studies. This research investigates dynamic properties of a bell-shape masonry stupa, which is the main stupa of Wat Yai Chaimongkol, Ayutthaya, Thailand. The 70-meter high stupa constructed in A.D. 1592 has been subjected to aging and adverse environment effects. At present, inclination of the stupa and deterioration of material are clearly observable. In this study, dynamic characteristics of the stupa were identified by ambient vibration measurements. Natural frequencies of the translational modes were obtained from Fourier spectrum of the measured vibrations of the stupa. Vibration mode shapes were computed from the ratio of the Fourier amplitudes. The results of the dynamics properties can be used to calibrate the Finite Element model for further structural assessments and serve as reference values for long-term monitoring.

Keywords: dynamic properties; ambient vibration test; ancient stupa; Ayutthaya

1. บทนำ

โครงสร้างโบราณสถานเป็นโครงสร้างที่เปราะบางต่อแรงที่กระตุ้นจากสภาพแวดล้อมต่าง ๆ และเมื่อเกิดภัยธรรมชาติ โครงสร้างเหล่านั้นโดยเฉพาะกลุ่มที่ไม่ได้บำรุงรักษาอย่างต่อเนื่องไว้มักเกิดความเสียหายอย่างรุนแรง ตัวอย่าง เช่น ผลจากแผ่นดินไหวที่ประเทศเนปาลเมื่อวันที่ 25 เมษายน 2558 ที่สร้างความเสียหายต่อโบราณสถานจำนวนมากในแหล่งมรดกโลกในกรุงกาฐมาณฑุ และเหตุการณ์แผ่นดินไหวในประเทศเมียนมาร์เมื่อวันที่ 24 สิงหาคม 2559 ที่ส่งผลให้เจดีย์โบราณของอาณาจักรพุกามจำนวนมากหลายร้อยองค์ได้รับความเสียหาย แนวทางในการศึกษาเพื่อการอนุรักษ์โครงสร้างโบราณสถานจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อรักษาให้เกิดความมั่นคงแข็งแรงสืบไป

สำหรับประเทศไทย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา มีโบราณสถานสำคัญของประเทศจำนวนมาก และได้รับการยกย่องให้เป็นมรดกโลกจากองค์การการศึกษาวิทยาศาสตร์และวัฒนธรรมแห่งสหประชาชาติ (UNESCO) เมื่อวันที่ 13 เดือน ธันวาคม พุทธศักราช

2534 ในการประชุมคณะกรรมการมรดกโลกสมัยสามัญครั้งที่ 15 ที่เมืองคาร์เธจ ประเทศตูนิเซีย ด้วยข้อกำหนดและหลักเกณฑ์พิจารณาให้เป็นมรดกโลก โดยใช้ชื่อว่า “นครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาและเมืองบริวาร” [1] ปัจจุบันนครประวัติศาสตร์แห่งนี้กำลังได้รับผลกระทบจากหลายปัจจัยทั้งด้านสภาพแวดล้อม ได้แก่ การเสื่อมของคุณภาพวัสดุตามกาลเวลา สภาพอุณหภูมิ ความชื้น อุทกภัย และการทรุดตัวของชั้นดินที่ฐานรองรับ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างโบราณสถาน ตัวอย่างที่สำคัญ คือ องค์พระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล ที่มีความสูงกว่า 70 เมตร ซึ่งเป็นพระเจดีย์มีความสูงที่สุดในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา และมีความสำคัญอย่างยิ่งด้านประวัติศาสตร์ โบราณคดี สถาปัตยกรรม และวิศวกรรม ในปัจจุบันโครงสร้างของพระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคลนี้มีการเสื่อมสภาพไปตามกาลเวลา และส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงมั่นคง โดยองค์พระเจดีย์มีการเอียงตัวของส่วนบนออกจากศูนย์กลางของฐานอย่างชัดเจนแม้มองจากสายตาเปล่า

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้าง เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของโครงสร้างเพื่อใช้ในการวางแผนบำรุงรักษาได้อย่างเหมาะสมต่อไป

สำหรับกระบวนการศึกษาเพื่อประเมินความมั่นคงของโครงสร้างโดยหลักวิศวกรรม สามารถทำได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างจากสมมติฐานของสมบัติวัสดุ รูปทรง และการยึดประสานภายในชิ้นส่วนและกับที่รองรับ โดยการสร้างแบบจำลองจำเป็นต้องมีแนวทางการตรวจสอบและปรับแก้ให้ถูกต้อง ซึ่งอาจทำได้โดยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับค่าที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจริง วิธีที่มีความสะดวกในการปฏิบัติคือการเปรียบเทียบสมบัติเชิงพลศาสตร์ ได้แก่ ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) และรูปร่างการสั่นไหว (vibration mode shape) ที่ได้จากแบบจำลองและปรับปรุงพารามิเตอร์ในแบบจำลองเพื่อให้ผลการวิเคราะห์ให้ได้ผลใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากผลการตรวจวัดจริง ดังนั้นสมบัติเชิงพลศาสตร์ขององค์พระเจดีย์ในสภาพปัจจุบันจึงมีความสำคัญเพื่อการประเมินพฤติกรรมการรับน้ำหนักเพื่อเป็นประโยชน์ในการตรวจสอบและบำรุงรักษาโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต นอกจากนี้ สมบัติเชิงพลศาสตร์ยังเป็นข้อมูลสำคัญในการพิจารณาพฤติกรรมของโครงสร้างในด้านการคำนวณหาแรงเพื่อการออกแบบและการประเมินระดับการโยกตัวของโครงสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งพฤติกรรมภายใต้แรงพลศาสตร์ เช่น แรงจากแผ่นดินไหว แรงลม โดยใช้ควบคู่กับการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างภายใต้แรงกระทำดังกล่าว อีกทั้งข้อมูลสมบัติเชิงพลศาสตร์ยังสามารถใช้ในการประเมินสมบัติของโครงสร้าง เช่น สติฟเนสของโครงสร้าง เพื่อเป็นประโยชน์ในการตรวจสอบและบำรุงรักษาโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต โดยใช้เป็น

ค่าอ้างอิงเทียบกับการตรวจสอบเมื่อใช้งานโครงสร้างเป็นเวลายาวนาน

การศึกษาสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโบราณสถานในต่างประเทศมีตัวอย่างการประยุกต์อย่างกว้างขวาง ได้แก่ Gentile และ Saisi ปี ค.ศ. 2007 [2] ตรวจวัดการสั่นไหวโครงสร้างหอระฆังซึ่งเป็นโบราณสถานที่เป็นอัฐกู่ ซึ่งเกิดรอยร้าวและแตกขนาดใหญ่โดยใช้การตรวจวัดการสั่นไหวเพื่อการทำนายพฤติกรรมจากแบบจำลอง Foti และคณะ เมื่อปี ค.ศ. 2012 [3] ได้ตรวจวัดการสั่นไหวในสภาวะแวดล้อมของโครงสร้างของหอคอยโบราณสถานในประเทศอิตาลี และวิเคราะห์แบบจำลองทางวิศวกรรมโดยตรวจสอบรูปร่างการสั่นไหว Votsis และคณะ เมื่อปี ค.ศ. 2012 [4] ได้ตรวจวัดการสั่นไหวของโบราณสถานซึ่งเป็นโบสถ์ 2 แห่ง ในประเทศไซปรัส โดยตรวจสอบวัดการสั่นไหวจากสภาวะแวดล้อม เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างและรูปร่างการสั่นไหวในโหมดที่มีความถี่ต่ำ Bartoli และคณะในปี ค.ศ. 2013 [5] ได้ตรวจสอบโครงสร้างของหอคอยโบราณสถานในประเทศอิตาลี มีชื่อว่า "Torre Grossa" ซึ่งสร้างด้วยอิฐกู่ ได้มีการตรวจสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ เพื่อวัดค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างและรูปร่างการสั่นไหว และสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีการสอบเทียบกับการตรวจวัดทางพลศาสตร์ Antonella และ Carmelo ค.ศ. 2015 [6] ตรวจสอบโครงสร้างหอคอยโบราณสถานที่เป็นอัฐกู่ที่สูงที่สุดในอิตาลีหลังเกิดแผ่นดินไหวเพื่อวางแผนอนุรักษ์ โดยการสำรวจโครงสร้างรูปทรงด้วยตาเปล่าและการตรวจวัดทางพลศาสตร์ด้วยวิธีการสั่นไหวทางธรรมชาติ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง ได้แก่ ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวขององค์พระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคลด้วยวิธีการตรวจวัดการสั่นสะเทือนจากสภาพ

แวดล้อม (ambient vibration) โดยใช้เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนร่วมกับเทคโนโลยีการตรวจวัดการสั่นไหวจากระยะไกลแบบไม่สัมผัสด้วยแสงเลเซอร์ เพื่อให้มีข้อมูลสำคัญของโครงสร้างจริงขององค์พระเจดีย์ในสถานะปัจจุบัน เพื่อการใช้ประโยชน์ด้านการบำรุงรักษาต่อไป

2. ประวัติของวัดใหญ่ชัยมงคลและการบูรณะ

วัดใหญ่ชัยมงคลก่อตั้งในสมัยกรุงศรีอยุธยา ประมาณปี พ.ศ. 1900 มีข้อสันนิษฐานว่าองค์พระเจดีย์ถูกสร้างขึ้นในรัชสมัยสมเด็จพระนเรศวรมหาราช (พ.ศ. 2135) หรือพระองค์อาจทรงปฏิสังขรณ์สร้างพระเจดีย์ใหญ่ทับองค์เจดีย์เดิมที่สร้างไว้ตั้งแต่รัชสมัยสมเด็จพระรามาธิบดีที่ 1 ซึ่งภายหลังวัดใหญ่ชัยมงคลได้ถูกปล่อยร้างถึงประมาณ พ.ศ. 2500 จนกองโบราณคดี กรมศิลปากร ได้เริ่มเข้าสำรวจและอนุรักษ์ซึ่งพบว่าองค์พระเจดีย์ทรุดโทรมมาก มีรอยแตกร้าวรอบด้าน ตรงบัลลังก์แปดเหลี่ยมเหนือองค์ระฆังถูกคนร้ายขุดเป็นโพรงกว้าง องค์พระเจดีย์เอียงไปในทิศตะวันตก และเจดีย์ทิศที่ตั้งอยู่บนฐานใหญ่ทั้ง 4 องค์ มีรอยแตกร้าวใกล้จะพังลงมา จึงได้เริ่มบูรณะในปี พ.ศ. 2518 แต่การบูรณะมีข้อจำกัดตามงบประมาณ ต่อมา กองสถาปัตยกรรม กรมศิลปากร ได้ดำเนินการต่อใน พ.ศ. 2521 โดยใช้วัสดุสัง 8 เส้น ยึดองค์ระฆังตรึงไว้กับฐานคอนกรีตด้านทิศตะวันออกเฉียงเหนือเพื่อกันการเอียง การเอียงขององค์พระเจดีย์ไม่ปรากฏหลักฐานว่าเริ่มเอียงในสมัยใด ผลการตรวจสอบในขณะนั้นปรากฏว่าเอียงไปทางทิศตะวันตก 3.72 เมตร การทรุดตัวอาจเกิดขึ้นหลังจากการก่อสร้างองค์พระเจดีย์เสร็จซึ่งเป็นเวลากว่า 400 ปีแล้ว น้ำหนักจากองค์พระเจดีย์กดลงบนพื้นทำให้ดินทรายละเอียดปนสลับกับชั้นทรายปนดินยุบตัวเนื่องจากเม็ดทรายแตก และน้ำใต้ดินที่มีอยู่มากในระดับ 8 ถึง 10 เมตร ถูกบีบดัน

ออกไปเกิดช่องว่างขึ้นและมีการทรุด ตามผลการคำนวณปรากฏว่ามีการทรุดประมาณ 25 ซม. การที่องค์พระเจดีย์เอียงไปทางทิศตะวันตกอาจเนื่องจากช่องว่างที่เกิดขึ้นในชั้นดินและทรายในทางทิศตะวันตกมีมากกว่าในทิศทางอื่น [8] สภาพองค์พระเจดีย์ในอดีตและปัจจุบันแสดงดังรูปที่ 1

3. วิธีการศึกษา

วิธีที่ใช้ในการศึกษาค่าสมบัติเชิงพลศาสตร์ของเจดีย์จากการตรวจวัดประกอบด้วยการหาค่าความถี่ธรรมชาติและการหารูปการสั่นไหว ซึ่งในการศึกษานี้ใช้การตรวจวัดผลตอบสนองในสภาพแวดล้อมปกติ (ambient vibration test) ซึ่งเป็นการสั่นไหวที่มีขนาดเล็กของโครงสร้างเนื่องจากการกระตุ้นในระดับต่ำจากแรงที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อมตลอดเวลา ได้แก่ แรงลมและการจราจรในบริเวณใกล้เคียง เป็นต้น แล้ววิเคราะห์ข้อมูลในพิสัยความถี่ (frequency domain) เพื่อการหาค่าสมบัติเชิงพลศาสตร์ การตรวจวัดภาคสนามใช้เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนแบบวัดความเร็วร่วมกับเครื่องวัดแบบแสงเลเซอร์ไม่สัมผัส โดยมีลักษณะโดยสรุปดังหัวข้อ 3.1 และ 3.2 ส่วนหลักการวิเคราะห์ข้อมูลสรุปไว้ในหัวข้อที่ 3.3.

3.1 ชุดอุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดความเร็วของการสั่นสะเทือน

การตรวจวัดแบบ ambient vibration เป็นการตรวจวัดการสั่นไหวของอาคารที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระตุ้นตามธรรมชาติและไม่ได้ใช้แหล่งกระตุ้นจากภายนอกใด ๆ ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดจะต้องมีความสามารถในการตรวจวัดที่ระดับการสั่นสะเทือนต่ำมาก ๆ ได้ เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษานี้ชุดแรกเป็นเครื่องมือที่วางสัมผัสกับโครงสร้าง คือ อุปกรณ์วัดความเร็วของการสั่นสะเทือน (velocity sensor) ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ อุปกรณ์รับ

ข้อมูลที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแบบต่อเนื่องให้เป็นสัญญาณแบบดิจิทัล จากนั้นจึงส่งค่าให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกค่า โดยมี A/D Converter 24 bit ใช้ร่วมกับหัววัดสัญญาณความเร็วของการสั่นสะเทือน จำนวน 4 หัว ซึ่งแต่ละหัวสามารถวัดทิศ

ทางการสั่นได้ 3 ส่วน (component) คือ แนวตั้ง 1 ทิศทางและแนวระนาบ 2 ทิศทาง สามารถวัดการสั่นสะเทือนในระดับต่ำถึง micro m/s และมีช่วงความถี่ที่ใช้งานคือ 0.5 ถึง 50 Hz. โดยชุดอุปกรณ์นี้แสดงรูปที่ 2



รูปที่ 1 องค์พระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล (รูปซ้าย พ.ศ. 2522 และรูปขวา พ.ศ. 2559)



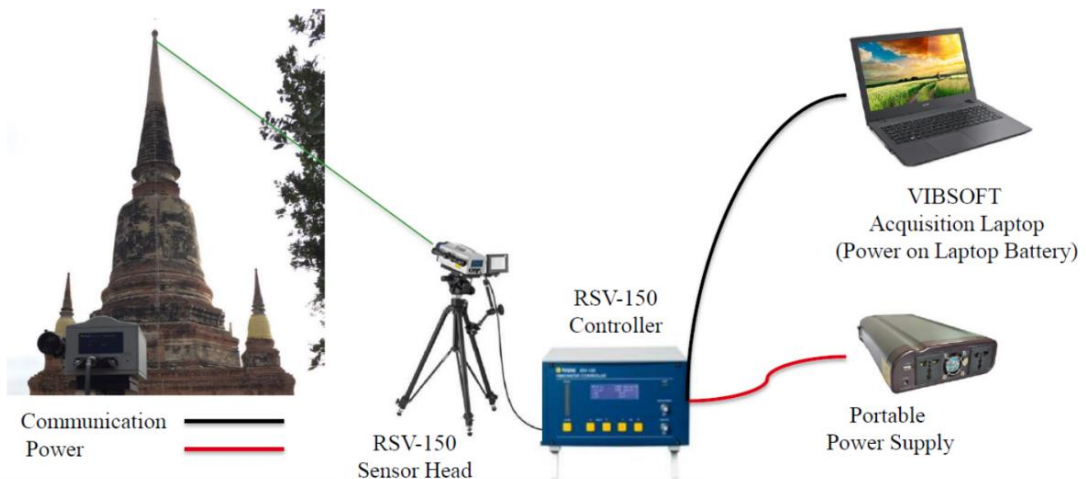
รูปที่ 2 ชุดอุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดความเร็วของการสั่นสะเทือน

3.2 ชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแบบไม่สัมผัสโดยเลเซอร์

การตรวจวัดการสั่นไหวที่บริเวณส่วนบนของพระเจดีย์ที่ไม่สามารถขึ้นไปติดตั้งเครื่องมือได้ จำเป็นต้องใช้เครื่องมือแบบไม่สัมผัสโดยเลเซอร์ โดยแสดงดังรูปที่ 3 ที่ประกอบไปด้วย เครื่องส่งและบันทึกสัญญาณแบบเลเซอร์ (RSV-150 Sensor Head) เครื่องควบคุมสัญญาณ (RSV-150 Controller) และคอมพิวเตอร์สำหรับการบันทึกสัญญาณ หลักการทำงานของชุดเครื่องมือวัดนี้ คือ เครื่อง ส่งลำแสง

เลเซอร์ไปยังพื้นผิวของวัตถุและลำแสงสะท้อนกลับมา
ยังภาครับสัญญาณโดยใช้หลักการของ laser doppler
แล้วภาครับสัญญาณทำหน้าที่แปลงข้อมูลให้อยู่ในรูป
ของสัญญาณไฟฟ้าและแสดงเป็นผลการตอบสนองใน
รูปแบบค่าการโยกตัวและความเร็วของการสั่นสะเทือน

จากนั้นจึงบันทึกข้อมูลลงบนคอมพิวเตอร์ ข้อจำกัดของ
เครื่องมือชุดนี้ คือ สามารถตรวจวัดได้ครั้งละตำแหน่ง
เดียว จึงไม่สามารถตรวจวัดหลายจุดพร้อมกันเพื่อหา
รูปร่างการสั่นไหวได้



รูปที่ 3 ชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแบบไม่สัมผัสโดยเลเซอร์

3.3 การวิเคราะห์ค่าสมบัติเชิงพลศาสตร์

วิธีที่ใช้วิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติมีหลัก
พื้นฐาน คือ ใช้สัญญาณการโยกตัวในสภาพธรรมชาติ
(ambient vibration) ของโครงสร้างมาแปลงให้อยู่ใน
รูปพิสัยเวลา (frequency domain) ด้วยเทคนิคการ
แปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) และพิจารณา
ค่าความถี่ที่เป็นองค์ประกอบหลักของสัญญาณเป็น
ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง หลักพื้นฐานของวิธี
นี้สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อพิจารณาแบบโครงสร้างที่
ถูกกระตุ้นด้วยแรงพลวัตแบบฮาร์โมนิกที่มีความถี่
หนึ่ง ๆ ระบบจะมีผลตอบสนองด้วยความถี่ของการ
กระตุ้นนั้น และผลตอบสนองจะมีขนาดสูงสุดเมื่อ
ความถี่ของการกระตุ้นมีค่าใกล้เคียงกับความถี่
ธรรมชาติของระบบนั้น (ซึ่งค่าความถี่ธรรมชาติของ
ระบบอาจมีได้มากกว่าหนึ่งค่า) ส่วนในสภาพธรรมชาติ

ที่แรงกระทำเป็นแบบสุ่มที่มีองค์ประกอบความถี่ต่าง ๆ
มากมาย เมื่อแรงลักษณะนี้กระทำต่อโครงสร้างซึ่งมี
สมบัติพื้นฐาน ที่มีความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วน
ความหน่วง ประจํารูปแบบการสั่นไหว (mode) ใดๆ
จึงพิจารณาได้ว่า โครงสร้างถูกแรงกระทำที่มีส่วนผสม
ของความถี่หลาย ๆ ค่า ดังนั้นผลการตอบสนองจึงเป็น
การผสมกันของผลตอบสนองในแต่ละองค์ประกอบ
ของความถี่ และมีความสำคัญสำหรับองค์ประกอบที่มี
ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติ หรือการสั่นพ้อง
(resonance) และสำหรับระบบโครงสร้างในปัญหานี้
การตอบสนองในแต่ละ Mode มีความถี่ธรรมชาติ
แต่ละค่าแตกต่างกันชัดเจน และมีความถี่อัตราส่วน
ความหน่วงค่อนข้างต่ำ ทำให้เส้นกราฟแสดงผล
ตอบสนองของระบบที่ความถี่ต่าง ๆ ของแรงกระตุ้น
จึงมียอดแหลมปรากฏค่อนข้างชัดเจน ดังนั้นค่าสมบัติ

เชิงพลศาสตร์ต่าง ๆ จึงสามารถประเมินได้ สำหรับการวิเคราะห์รูปร่างการสั่นไหวเพื่อนำไปศึกษาพฤติกรรมการไหวตัวของโครงสร้าง สามารถคำนวณได้จากการพิจารณาอัตราส่วนของความสูงของยอดแหลมจากผลการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณการสั่นไหว ที่ความถี่ธรรมชาติประจำรูปแบบการสั่นไหวนั้น ๆ สำหรับผลตอบสนอง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ การพิจารณาค่าอัตราส่วนฟูเรียร์ได้มีสมมติฐานคือ ค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละรูปแบบการสั่นไหวมีค่าแยกจากกันอย่างชัดเจน และระบบของโครงสร้างมีอัตราส่วนความหน่วงต่ำ

4. วิธีการตรวจวัด

การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์องค์พระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล ได้ดำเนินการตรวจวัด 2 ประเภท คือ การตรวจวัดการสั่นสะเทือนด้วยเครื่องตรวจวัดความเร็ว และการตรวจวัดด้วยเครื่องแบบไม่สัมผัสโดยเลเซอร์ โดยที่ตำแหน่งที่ตรวจวัดแยกเป็นช่วงล่างของพระเจดีย์ใช้เครื่องตรวจวัดความเร็วของการสั่นสะเทือนได้เนื่องจากสามารถวางได้สะดวกและวัดพร้อมกันได้หลายจุด และส่วนบนที่วางเครื่องมือวัดไม่ได้ ใช้การวัดจากเครื่องตรวจวัดแบบไม่สัมผัสโดยเลเซอร์ โดยที่ขั้นตอนแรกของการทำงานได้มีการสอบเทียบเครื่องมือทั้งสองให้วัดที่ตำแหน่งเดียวกัน เพื่อปรับค่าจากระบบหน่วยวัดจากทั้งสองระบบให้เป็นฐานเดียวกัน และเมื่อวัดด้วยเครื่องตรวจวัดแบบไม่สัมผัสโดยเลเซอร์ต้องมีการวัดด้านล่างด้วยเครื่องวัดความเร็วของการสั่นสะเทือนไปในเวลาเดียวกัน เพื่อนำไปหาอัตราส่วนของการสั่นไหวที่ส่วนบนเทียบกับค่าที่จุดอ้างอิงที่ส่วนล่าง รูปที่ 4 แสดงการเตรียมอุปกรณ์การตรวจวัดและตำแหน่งการวางเครื่องตรวจวัดแบบไม่สัมผัสโดยเลเซอร์

โดยตำแหน่งที่ตรวจวัดแสดงในรูปที่ 5 มีจำนวน

ทั้งสิ้น 8 ตำแหน่ง กระจายตลอดความสูงของพระเจดีย์ โดยส่วนล่างที่วางเครื่องวัดความเร็วของการสั่นสะเทือนคือตำแหน่งที่ระดับความสูง 0.9, 13.5, 26.2 และ 39.6 เมตร วัดจากพื้นดิน และสำหรับเครื่องวัดแบบไม่สัมผัสโดยเลเซอร์ ตำแหน่งที่วัด คือ 26.2, 32.2, 39.6, 45.8, 55.5 และ 69 เมตร รูปที่ 6 แสดงภาพขยายของการวางเครื่องวัดความเร็วของการสั่นสะเทือนที่ระดับ 39.6 เมตร



(ก)

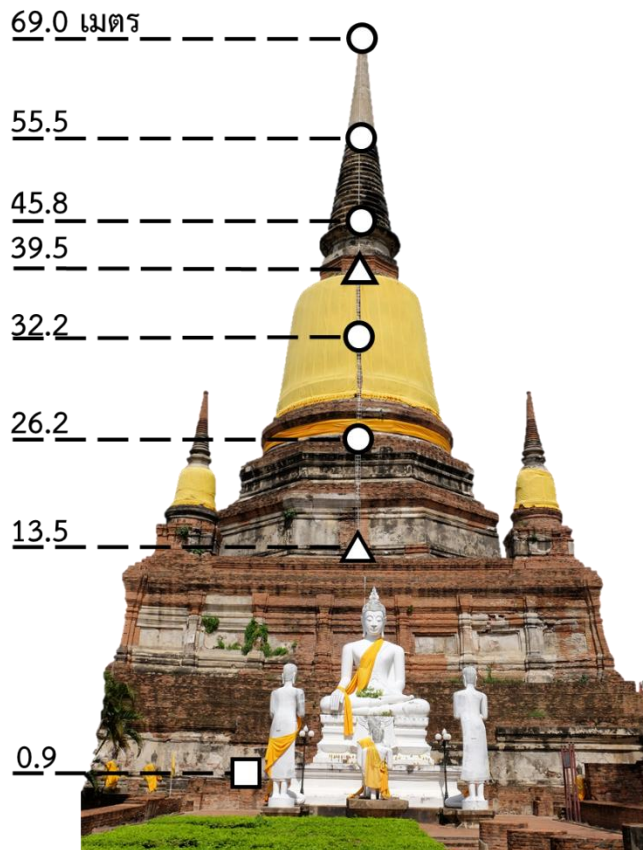


(ข)

รูปที่ 4 (ก) การเตรียมอุปกรณ์การตรวจวัด และ
(ข) การวางเครื่องตรวจวัดแบบไม่สัมผัส
โดยเลเซอร์

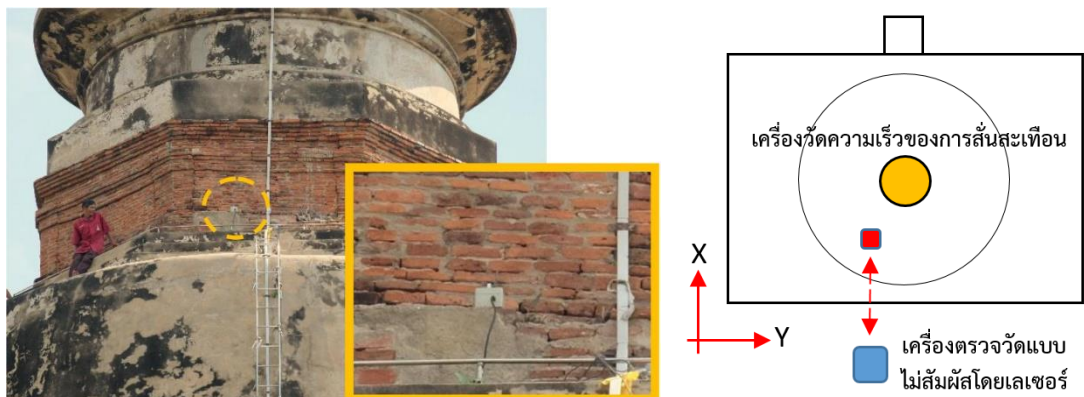
5. การวิเคราะห์สมบัติเชิงพลศาสตร์

5.1 ค่าความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) จากหลักการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติจากสัญญาณการสั่นสะเทือน ภายใต้อิทธิพลจากสภาพแวดล้อมที่อธิบาย



- ตำแหน่งสอบเทียบระหว่างเครื่องวัดความเร็วของการสั่นสะเทือนและแบบไม่สัมผัสโดยเลเซอร์
- △ ตำแหน่งตรวจวัดแบบไม่สัมผัสโดยเลเซอร์
- ตำแหน่งเครื่องวัดความเร็วของการสั่นสะเทือน

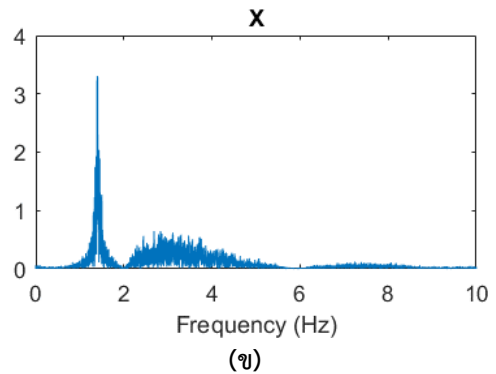
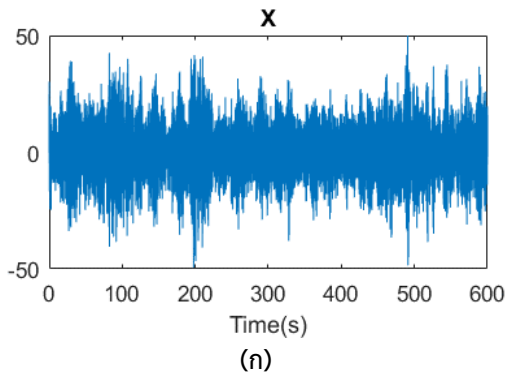
รูปที่ 5 ตำแหน่งการตรวจวัดการสั่นไหวบนองค์พระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล



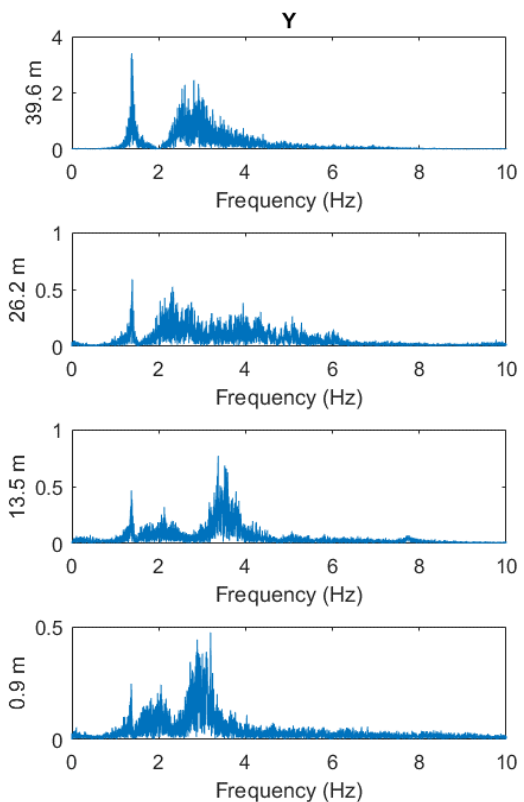
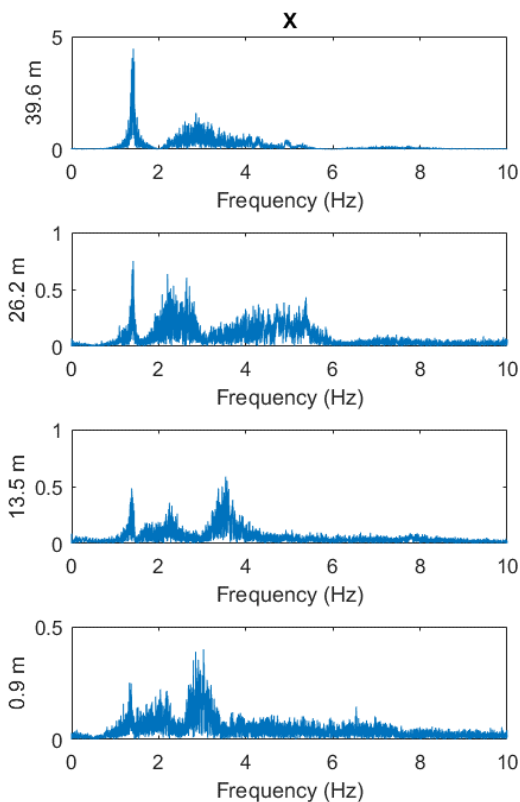
รูปที่ 6 การวางเครื่องวัดความเร็วของการสั่นสะเทือนที่ระดับความสูง 39.6 เมตร

ไว้ในหัวข้อ 3.3 ได้นำมาใช้วิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของพระเจดีย์ ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติ ณ ตำแหน่งที่ความสูง 39.6 เมตร

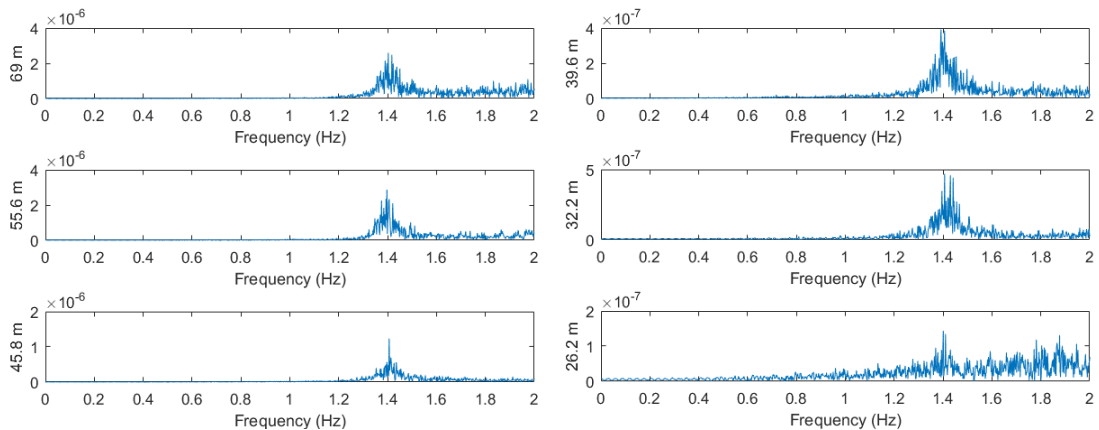
แสดงดังรูปที่ 7 โดยรูปที่ 7ก แสดงสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบสุ่มที่เป็นลักษณะธรรมชาติของโครงสร้าง จากข้อมูล 600 วินาที จำนวนข้อมูล 200



รูปที่ 7 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติ ณ ตำแหน่งที่ความสูง 39.6 เมตร (ก) สัญญาณความเร็วการสั่นสะเทือนตามเวลา และ (ข) ผลการแปลงฟูเรียร์



รูปที่ 8 ผลการแปลงฟูเรียร์จากเครื่องวัดความเร็วของการสั่นสะเทือนแต่ละตำแหน่งความสูงในสองทิศทาง



รูปที่ 9 ผลการแปลงฟูเรียร์จากเครื่องวัดแบบไม่สัมผัสโดยเลเซอร์แต่ละตำแหน่งความสูงในทิศทาง X

ค่าต่อวินาที และเมื่อแปลงฟูเรียร์ได้ผลดังรูปที่ 7 ข โดยที่แกนตั้งคือขนาดของฟูเรียร์และแกนนอนคือความถี่ โดยพบว่าเส้นกราฟฟูเรียร์มีค่าสูงมากที่บริเวณความถี่ประมาณ 1.4 Hz. ซึ่งระบุได้เป็นความถี่ธรรมชาติของการสั่นไหวของพระเจดีย์ ในลักษณะเดียวกัน เมื่อวิเคราะห์สัญญาณที่ตรวจวัดได้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 8 และ 9 สำหรับเครื่องวัดความเร็วของการสั่นสะเทือนและแบบไม่สัมผัสโดยเลเซอร์ ตามลำดับ โดยสรุปได้ว่าค่าความถี่ธรรมชาติของโหมดที่ 1 ในทิศทาง X มีค่าเท่ากับ 1.398 Hz และในทิศทาง Y มีค่าเท่ากับ 1.378 Hz และสำหรับที่มีความถี่ที่มีขนาดฟูเรียร์มากค่าอื่น ๆ นั้น ความถี่และขนาดฟูเรียร์มีค่าที่ไม่ชัดเจนและไม่คงตัว จึงไม่สามารถใช้ระบุความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นไหวได้อย่างแม่นยำและไม่ได้สรุปไว้ในการศึกษา

5.2 การวิเคราะห์รูปร่างการสั่นไหว (vibration mode shape)

การวิเคราะห์รูปร่างการสั่นไหว ใช้หลักการเทียบอัตราส่วนของขนาดฟูเรียร์จากสัญญาณการสั่นไหวที่ระดับความสูงต่าง ๆ ที่ตรวจวัดจากเครื่องวัดความเร็วของการสั่นสะเทือนและแบบไม่สัมผัสโดยเลเซอร์ แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 5.1

$$B_n = L_n \left(\frac{B_r}{L_r} \right) \quad (5.1)$$

โดยที่ L_r = ขนาดฟูเรียร์ของการตรวจวัดแบบไม่สัมผัสโดยเลเซอร์ ณ ตำแหน่งสอบเทียบ; L_n = ขนาดฟูเรียร์ของการตรวจวัดแบบไม่สัมผัสโดยเลเซอร์ที่ความสูงใด ๆ; B_r = ขนาดฟูเรียร์ของความเร็วของการสั่นสะเทือน ณ ตำแหน่งสอบเทียบ; B_n = ขนาดฟูเรียร์ของความเร็วของการสั่นสะเทือนที่ความสูงใด ๆ

โดยมีขั้นตอนการดำเนินการโดยย่อดังนี้

(1) ติดตั้งหัววัดความเร็วของการสั่นสะเทือนไว้ที่ตำแหน่ง 39.6 เมตร และระดับต่ำลงมาและเล็งกล้องเลเซอร์ไปที่ตำแหน่ง 39.6 เมตร แล้วตรวจวัดการสั่นไหว

(2) วิเคราะห์การแปลงฟูเรียร์ของข้อมูลจากเครื่องวัดทั้งสองระบบ แล้วเปรียบเทียบค่าขนาดของฟูเรียร์ที่ความถี่ธรรมชาติเพื่อหาอัตราส่วนสำหรับการปรับแก้จากเครื่องมือทั้งสองระบบ

(3) ตรวจวัดการสั่นไหวโดยเปลี่ยนตำแหน่งเป้าของเลเซอร์ ไปที่ตำแหน่งสูงต่าง ๆ และคงหัววัดความเร็วของการสั่นสะเทือนไว้ที่ตำแหน่งเดิม

(4) คำนวณรูปแบบการสั่นไหวของแต่ละตำแหน่ง โดยใช้อัตราส่วนของขนาดฟูเรียร์ที่วัดที่

ตำแหน่งต่าง ๆ โดยสำหรับห้วงวัดความเร็วของการสั่นสะเทือนที่วัดพร้อมกันสามารถใช้อัตราส่วนจากห้วงวัดเหล่านั้นได้โดยตรง แต่สำหรับค่าที่ส่วนบนจะใช้ค่าจากขนาดฟูเรียร์จากเครื่องมือแบบไม่สัมผัสโดยเลเซอร์และปรับแก้ด้วยค่าขนาดฟูเรียร์จากเครื่องวัดความเร็วของการสั่นสะเทือนที่วัดที่ระดับ 39.6 เมตร

ผลจากการวิเคราะห์แสดงค่ารูปร่างการสั่นไหวที่ระดับต่าง ๆ ดังตารางที่ 1 โดยเทียบค่าให้ค่าที่ปลายยอดมีค่าเท่ากับ 1.0 และรูปร่างการสั่นไหวแสดงในรูปที่ 10 โดยที่ในการศึกษานี้ตรวจวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วของการสั่นสะเทือนใน 2 ทิศทางที่ตั้งฉากกันคือ X และ Y แต่ตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจวัดแบบไม่สัมผัสโดยเลเซอร์เฉพาะด้าน X เท่านั้น โดยผลการศึกษาแสดงชัดเจนว่าในทิศทาง X การไหวตัวของพระเจดีย์มีลักษณะที่เกิดการสั่นที่บริเวณปลายบนที่สูงกว่าระดับ 45 เมตรขึ้นไป โดยเมื่อพิจารณาจากรูปร่างของเจดีย์ในรูปที่ 10 นี้สามารถชี้ได้ว่าที่บริเวณดังกล่าวมีการลดขนาดหน้าตัดของเจดีย์ลงอย่างมาก ทำให้ความแข็งแรงในบริเวณดังกล่าวลดลง โดยเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบความเสียหายกับเจดีย์จากผลของแผ่นดินไหวต่าง ๆ เช่น เจดีย์หลวง จังหวัดเชียงราย ที่เสียหายในเหตุการณ์แผ่นดินไหว พ.ศ. 2554 พระธาตุจอมหมอกแก้ว จังหวัดเชียงราย จากเหตุการณ์แผ่นดินไหว พ.ศ. 2557 เจดีย์ในกรุงเทพมหานคร จากเหตุการณ์แผ่นดินไหว พ.ศ. 2558 และเจดีย์จำนวนมากในเมืองพุกาม ประเทศเมียนมาร์ จากเหตุการณ์แผ่นดินไหว พ.ศ. 2559 ที่เกิดการหักพังหลายที่บริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดอย่างมาก ดังนั้นบริเวณดังกล่าวของพระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล และเจดีย์โบราณสถานต่าง ๆ จึงควรมีการทำให้มีความแข็งแรงมั่นคงมากขึ้น เพื่อการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนเนื่องจากแรงพลศาสตร์ที่กระทำต่อพระเจดีย์

ตารางที่ 1 รูปร่างการสั่นไหวตามความสูงของพระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล ในทิศทาง X ที่ความถี่ธรรมชาติ 1.398 เฮิรตซ์ และในทิศทาง Y ที่ความถี่ธรรมชาติ 1.378 เฮิรตซ์

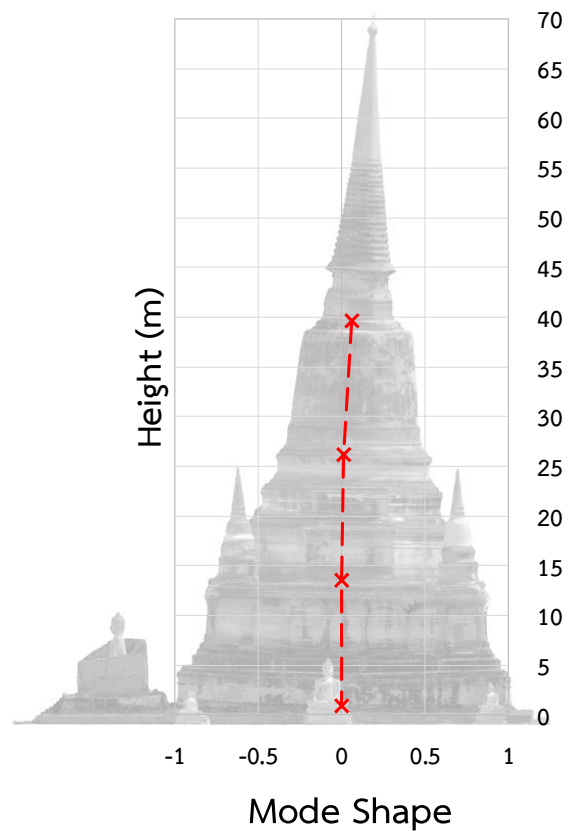
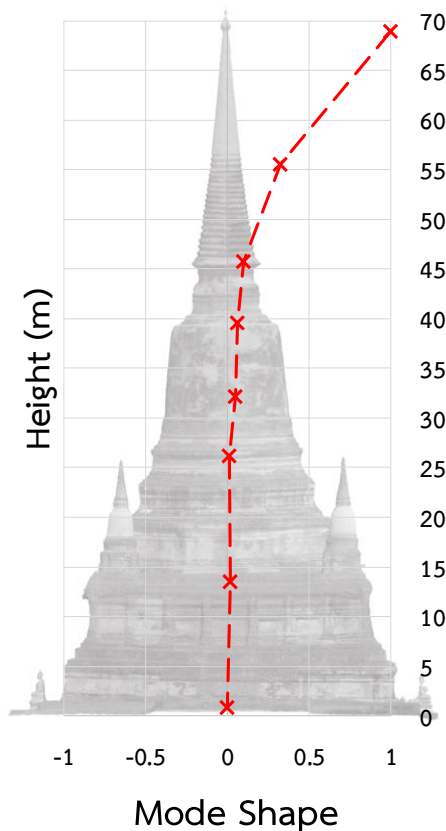
ความสูง (H) (เมตร)	รูปร่างการสั่นไหว (mode shape)	
	ทิศทาง X	ทิศทาง Y
68.97	1.000	-
55.55	0.326	-
45.79	0.101	-
39.58	0.064	0.064
32.19	0.052	-
26.18	0.012	0.011
13.48	0.021	0.001
0.84	0.004	0.000

6. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

บทความนี้นำเสนอผลการสำรวจสมบัติเชิงพลศาสตร์ของพระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยการตรวจวัดการสั่นสะเทือนจากสภาพแวดล้อม เพื่อศึกษาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นไหว โดยใช้เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนแบบสัมผัสร่วมกับแบบไม่สัมผัสด้วยแสงเลเซอร์ โดยได้ผลการศึกษา คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของรูปแบบการสั่นไหวลำดับที่หนึ่งมีค่าเท่ากับ 1.378 และ 1.398 Hz สำหรับใน 2 ทิศทาง ในแนวราบที่ตั้งฉากกัน และรูปร่างการสั่นไหวที่สามารถแสดงถึงรูปร่างที่พระเจดีย์เกิดการโยกตัวหลักที่พบว่ารูปร่างการเคลื่อนตัวของพระเจดีย์มีค่าเพิ่มอย่างฉับพลันบริเวณที่มีการลดลงของขนาดหน้าตัดที่ส่วนยอดของเจดีย์ ผลการศึกษาที่ได้สามารถใช้ในการปรับแก้แบบจำลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักต่าง ๆ ของโครงสร้างเจดีย์นี้ได้ และใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับ

การติดตามการเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตสำหรับการวางแผนการบำรุงรักษา นอกจากนั้น รูปทรงที่เจดีย์มีการโยกตัวมากที่บริเวณที่มีการลดขนาดหน้าตัดอย่างมาก

นั้นแสดงถึงจุดอ่อนของโครงสร้างที่ควรมีการพิจารณาหาแนวทางเสริมความแข็งแรงเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับพระเจดีย์จากแรงพลศาสตร์



รูปที่ 10 รูปทรงการสั่นไหว (ก) ทิศทาง X ที่ความถี่ธรรมชาติ 1.398 เฮิรตซ์ และ (ข) ทิศทาง Y ที่ความถี่ธรรมชาติ 1.378 เฮิรตซ์

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 ขอขอบคุณสำนักศิลปากรที่ 3 พระนครศรีอยุธยา และวัดใหญ่ชัยมงคล ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการดำเนินการวิจัย และบริษัท Polytec South East Asia ที่สนับสนุนอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่นแบบไม่สัมผัสโดยเลเซอร์

8. รายการอ้างอิง

- [1] กรมศิลปากร, 2543, อุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา, บริษัท ศรีเมืองการพิมพ์ จำกัด.
- [2] Gentile, C. and Sais, I.A., 2007, Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment, Constr. Build. Mater.

- 21: 1311-1321.
- [3] Foti, D., Diaferio, M., Giannoccaro, N. and Mongelli, M., 2012, Ambient vibration testing dynamic identification and model updating of a historic tower, *NDT&E Int.* 47: 88-95.
- [4] Votsisa, R.A., Kyriakidesa, N., Chrysostomoua, C.Z., Tantelea, E. and Demetriou, T., 2012, Ambient vibration testing of two masonry monuments in Cyprus, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 43: 58-68.
- [5] Bartoli, G., Betti, M. and Giordano, S., 2013, *In situ* static and dynamic investigations on the “Torre Grossa” masonry tower, *Eng. Struct.* 52: 718-733.
- [6] Antonella, S. and Carmelo, G., 2015, Post-earthquake diagnostic investigation of a historic masonry tower, *J. Cult. Herit.* 16: 602-609.
- [7] Pakrashi, V. and Wirth, G., 2013, Enhanced Laser Doppler Vibrometer Technology Enables Non-Contact Vibration Measurements on Large Distances, *Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES 13)*, Ouro Preto, Brazil, 2522.
- [8] กรมศิลปากร, 2522, การอนุรักษ์พระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคลของกรมศิลปากร, กรมศิลปากร, กรุงเทพฯ.